



## **DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN OPCIÓN AL GRADO  
ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

METODO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE  
COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES  
EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL

Autor:

Carlos Luís Vargas Ferruzola

Tutor:

PhD. Enrique Torres Tamayo

LATACUNGA – ECUADOR

20 de Junio – 2017



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADO**  
**Latacunga – Ecuador**

---

**AVAL DEL TRIBUNAL DE GRADO**

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado, aprueban el presente informe e Investigación de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Carlos Luís Vargas Ferruzola, con el título de tesis: “METODO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 20 de Junio – 2017.

Para constancia firman:

.....  
PhD. Secundino Marrero Ramirez  
CI:1757107907  
PRESIDENTE

.....  
MSc. Xavier Proaño Maldonado  
CI:0502656424  
MIEMBRO

.....  
PhD. Juan Mato Tamayo  
CI:1756944284  
MIEMBRO

.....  
MSc. Edwin Lema Guamán  
CI:0302241351  
OPONENTE

## **AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS**

**En mi calidad de Tutor del Programa de Maestría en Gestión de Energías, nombrado por el Consejo de Posgrado.**

### **CERTIFICO:**

**Que: analizado el Protocolo de Trabajo de Titulación, presentado como requisito previo a la aprobación y desarrollo de la investigación para optar por el grado de Magíster en Gestión de Energías.**

El problema de investigación se refiere a:

**“METODO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”**

Presentado por **Carlos Luís Vargas Ferruzola** con cedula de ciudadanía N<sup>ro</sup>. **0919682849**

**Sugiero su aprobación y permita continuar con la ejecución del proyecto de investigación y desarrollo.**

Latacunga, 20 de Junio de 2017

Atentamente,

.....  
PhD Enrique Torres Tamayo

**DIRECTOR DE TESIS**

## **RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS**

Dejo constancia que el presente proyecto de investigación, es de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor con el tema, **“METODO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.”** previo a la obtención del título **Magíster en Gestión de Energías**, es original auténtico y personal, a excepción de las citas.

En tal virtud, declaro que el contenido, las conclusiones y efectos legales y académicos que se desprenden del trabajo propuesto de investigación y luego de la redacción de este documento son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica.

Atentamente

.....  
Ing. Carlos Luís Vargas Ferruzola

C.C. 0919682849

## **AGRADECIMIENTO**

En el presente trabajo agradezco a Dios por la salud y sabiduría que me ha dado, a mis padres Carlos Vargas y Adda Ferruzola por la educación y valores recibidos y haberme formado con espíritu emprendedor y de superación, a mi esposa por el apoyo incondicional en todo el tiempo que dedique a mis estudios de postgrado, a mis hijos por ser la fuente principal de inspiración y al PhD. Enrique Torres Tamayo, quien aportó su conocimiento, tiempo y paciencia para alcanzar mi objetivo propuesto.

**Carlos Vargas Ferruzola**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mi esposa Karla y a mis hijos Ariana y Ariel Vargas Herrera.

**Carlos Vargas Ferruzola**

# **UNIVERSITY OF COTOPAXI POSGRADUATE DIRECTION**

## **ENERGY MANAGEMENT MASTER 'S DEGREE**

**Topic:**

Theoretical experimental method for the evaluation of flat plate solar collectors in single-family homes in the city of Guayaquil.

**Author: Ing. Carlos Vargas Ferruzola**

**Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo**

### **ABSTRACT**

The use of hot water in single-family homes has been increasing and to meet the demand implies high energy consumption either this electric or petroleum-based fuels, which requires a system that satisfies the demand with a decrease in energy consumption and protection environment. In this project an experimental theoretical analysis of flat plate solar collectors is made based on the main variables involved in the process, for its implementation in single family dwellings. The procedure described allows the selection of the collectors and the calculation of their efficiency, is applicable to the conditions of the city of Guayaquil. The angle of inclination of the collector where the maximum efficiency is reached is 150, this coincides with the criteria of the literature where it is established that the angle of inclination of the collector must be between 100 and 150 above the latitude of the place. The maximum average efficiency achieved experimentally in the flat solar collector is 30.12%. The recovery time of the investment by energy saving in the use of a renewable energy source is of 7.19 years, to this it is necessary to add the almost null environmental impact that causes the use of this type of energy and the durability Estimated from flat solar collectors that is 25 years.

Due to the above, it is considered viable the project for the heating of water in single-family homes.

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSTGRADO

### MAESTRIA EN GESTION DE ENERGÍAS

**Título:**

Método teórico experimental para la evaluación de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares en la ciudad de Guayaquil.

**Autor: Ing. Carlos Vargas Ferruzola**

**Tutor: PhD. Enrique Torres Tamayo**

### RESUMEN

El uso de agua caliente en las viviendas unifamiliares ha ido en incremento y para satisfacer la demanda implica gran consumo energético ya sea este eléctrico o combustibles derivados del petróleo, lo cual requiere un sistema que satisfaga la demanda con una disminución del consumo energético y la protección del medio ambiente.

En este proyecto se realiza un análisis teórico experimental de colectores solares de placa plana a partir de las principales variables involucradas en el proceso, para su implementación en viviendas unifamiliares. El procedimiento expuesto permite la selección de los colectores y el cálculo de su eficiencia, es aplicable a las condiciones de la ciudad de Guayaquil. El ángulo de inclinación del colector donde se alcanza la máxima eficiencia es de  $15^{\circ}$ , ello coincide con los criterios de la literatura donde se establece que el ángulo de inclinación del colector debe estar entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  por encima de la latitud del lugar. La eficiencia promedio máxima lograda de forma experimental en el colector solar plano es de 30,12 %. El tiempo de recuperación de la inversión por concepto de ahorro energético en el uso de una fuente renovable de energía es de 7,19 años, a ello es necesario añadir el casi nulo impacto ambiental que provoca el uso de este tipo de energía y la durabilidad estimada de los colectores solares planos que es de 25 años. Por lo anteriormente planteado se considera viable el proyecto para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares.

<b>INDICE</b>	<b>Página</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	1
<b>CAPÍTULO I: MARCO DE REFERENCIA</b> . . . . .	8
1.1. Marco Teórico . . . . .	8
1.1.1. Evaluación térmica de los calentadores solares . . . . .	8
1.1.2. El Sol Como Fuente De Energía . . . . .	10
1.1.3. Radiación Solar Terrestre . . . . .	11
1.1.4. Equipos fundamentales que integran la captación térmica de la energía solar	14
1.1.5. Criterios para la selección de un colector. Eficiencia del colector . . . . .	22
1.1.6. Características de los circuitos en el calentamiento del agua a baja temperatura	23
1.2. Marcos temporal . . . . .	31
1.3. Marco Legal . . . . .	31
1.3.1. Normas legislativas y regulatorias en el Ecuador relacionadas con el uso de la energía solar . . . . .	31
1.3.2. Normas internacionales para evaluar colectores solares . . . . .	33
<b>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES.</b>	<b>35</b>
2.1. Ubicación geográfica y características de consumo de viviendas unifamiliares	35
2.2. Método para el cálculo de la radiación solar incidente . . . . .	35
2.2.1. Método para el cálculo de la declinación solar y pendiente de los colectores	37

2.3. Método para el cálculo del número de colectores y el volumen del sistema de almacenamiento . . . . .	38
2.3.1. Demanda Energética . . . . .	38
2.3.2. Área de captación . . . . .	39
2.3.3. Número de colectores y Volumen del depósito de almacenamiento . . . . .	40
2.3.4. Procedimiento para el cálculo del depósito de almacenamiento . . . . .	40
2.3.4. Procedimiento para el cálculo de la transferencia de calor por convección . . . . .	42
2.5. Cálculo de la absorción, reflexión y transmisión de la radiación en el colector solar plano . . . . .	42
2.6. Método para el cálculo de la eficiencia real del sistema de calentamiento . . . . .	45
2.6. Cálculo del coeficiente global de pérdida de calor $U_L$ . . . . .	47
2.7. Factor de eficiencia del colector plano y factor de calor removido . . . . .	50
2.8. Procedimiento para la conexión de los colectores solares planos . . . . .	51
2.9. Características del subsistema de almacenamiento y de apoyo . . . . .	54
2.10. Procedimiento para el procesamiento estadístico de los resultados en el colector solar plano . . . . .	56
2.11. Instrumentos . . . . .	58
<b>CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES . . . . .</b>	<b>60</b>
3.1. Resultados de la ubicación geográfica . . . . .	60
3.2. Resultados del estudio solar de la zona . . . . .	62

3.3. Resultados de la demanda energética . . . . .	67
3.4. Selección del colector para el calentamiento de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares . . . . .	68
3.5. Resultados del cálculo de la eficiencia del colector . . . . .	70
3.6. Resultados del cálculo de la Absorción, reflexión y transmisión de la radiación en el colector solar plano . . . . .	75
<b>CAPÍTULO IV: EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES</b>	
4.1. Objetivo . . . . .	79
4.2. Estructura . . . . .	79
4.2.1 Evaluación de la eficiencia energética . . . . .	79
4.2.2 Procedimiento para el cálculo de eficiencia real del colector seleccionado	80
4.2.3 Técnica experimental para determinar eficiencia del colector solar plano	81
4.2.4. Selección del ángulo de inclinación y orientación del colector solar plano	81
4.2.5. Cálculo de la radiación solar incidente y el número de corridas experimentales	82
4.3. Análisis de los resultados experimentales . . . . .	82
4.4. Valoración económica de la propuesta . . . . .	90
4.4.1 Valoración económica de la propuesta . . . . .	92
<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>	<b>94</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>100</b>

## INTRODUCCIÓN

### Planteamiento del problema

La contribución de la energía solar térmica al consumo energético mundial sigue siendo muy escasa todavía, pese a que empiezan a percibirse ciertos síntomas de cambio que permiten ser más optimistas de cara al futuro. Al creciente interés de los ciudadanos por este tipo de soluciones hay que sumar las ayudas e incentivos que se han puesto en marcha en muchos países del mundo y la reducción de precios de los captadores solares en algunos mercados, especialmente activos, como China o Japón. Una situación que pone de manifiesto que estamos ante una tecnología madura que ha experimentado un significativo avance durante los últimos años.

En la actualidad la capacidad de energía solar instalada en el mundo supera a la de otras renovables con altos índices de desarrollo, como es el caso de la energía eólica. Con una potencia instalada de 180 GW térmicos a finales de 2014 (Holm, 2015), la solar térmica ha alcanzado unos niveles de popularidad impensables hace tan solo unos años. Y no exclusivamente por lo que a la producción de agua caliente se refiere, sino también en cuanto a la calefacción de viviendas.

Europa representa tan solo el 9 % del mercado mundial de energía solar térmica con una potencia instalada de 16.2 GW térmicos a finales de 2014, o lo que es lo mismo, un total de 18 millones de m<sup>2</sup> de captadores solares en funcionamiento. El impulso que ha recibido esta industria durante los últimos años, es lo que ha permitido dar un paso firme en el objetivo común de alcanzar los 200 millones de m<sup>2</sup> de superficie instalada que se pretenden conseguir en el horizonte de 2020 (Holm, 2015).

El gobierno ecuatoriano busca diversificar la matriz energética del país, además de atraer inversión extranjera y desplazar la generación con combustibles caros y contaminantes como el diesel. Se han desarrollado varios proyectos para el uso de la energía solar térmica en la generación de energía mediante los paneles fotovoltaicos y el calentamiento de agua para el uso de instalaciones hoteleras, restaurantes, entre otros. Los proyectos sumados con la generación eólica alcanzan una potencia total de 287,7 megavatios (MW) (<http://www.conelec.gob.ec/>).

Las predicciones que se han hecho en los últimos años sobre el consumo de energía vaticinan un gran aumento en el consumo de energía eléctrica o de combustibles fósiles. Por todo esto se establece la necesidad de implantar otros métodos autosuficientes para cubrir nuestros requerimientos, esto implicará el desarrollo de nuevos recursos energéticos propios. Recursos que al inicio implicarán rubros altos, pero al momento de su funcionamiento los costos de inversión son justificados en razón de los 15 años de vida útil que se estima para un calentador solar de agua, y del mínimo mantenimiento que se requiere para un sistema de este tipo, se podría alcanzar hasta un 80% de ahorro energético, mientras el sistema cumpla el periodo de servicio.

La utilización de agua caliente en las viviendas unifamiliares ha ido en incremento y con los actuales sistemas de suministro de agua caliente para satisfacer la demanda implican un gran consumo energético ya sea este eléctrico o combustibles derivados del petróleo, lo cual requiere un sistema que satisfaga la demanda con una disminución de tal consumo energético.

## **Formulación del Problema**

¿Cómo reducir los consumos energéticos para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil, mediante la evaluación teórica y experimental de colectores solares de placa plana?

## **Sistematización del problema**

- a. ¿Cómo efectuar el levantamiento de información para realizar teórica y experimentalmente la evaluación de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil?
- b. ¿Cómo determinar las condiciones actuales los colectores solares de placa plana en las viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil?
- c. ¿Cómo realizar un análisis en el sistema de distribución de agua caliente en las viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil?
- d. ¿Qué propuesta se aplicaría en el sistema de distribución de agua para obtener una mejor eficiencia en los colectores solares de placa plana?

## **Justificación de la investigación**

### **Importancia**

El desarrollo de este trabajo de investigación está relacionado con el análisis teórico experimental de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares, que permita proponer alternativas de solución relacionadas con la reducción del consumo energético, mediante un procedimiento de ingeniería aplicable a las condiciones de la Ciudad de Guayaquil.

### **Impacto Social**

El beneficiario primario serán las familias, quienes evitarán los costos elevados por excesivo consumo energético. Los beneficiarios secundarios serán los profesionales técnicos, mecánicos, electromecánicos, eléctricos y empresas o industrias las que están dedicadas a realizar construcciones, instalaciones y montajes de los sistemas de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares.

Finalmente, se beneficiaran los estudiantes y profesores de la facultad de Ciencias e Ingeniería Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi ya que el procedimiento obtenido puede ser usado en clases para diseños y análisis de un sistema eficiente de consumo de energía en sistemas de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares.

### **Impacto Teórico**

Se realizará un gran aporte dirigido a los estudiantes, y profesionales eléctricos, electromecánico y mecánicos industriales ya que ayudará con el estudio y diseño de nuevos métodos de mejoramiento de los sistemas de colectores solares de placa plana más eficientes optimizando el máximo de recursos disponibles y cumpliendo con estándares y normas de diseño vigentes.

### **Implicancia Práctica**

Al culminar el desarrollo del análisis teórico experimental de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil, el usuario podrá realizar análisis necesarios para el diseño de sistemas de colectores solares de placa plana de una manera más sencilla y rápida. Contribuyendo así a aumentar la eficiencia al momento de diseñar e implementar los sistemas de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares.

### **Objetivo General**

Evaluar, de forma teórica y experimental, colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer el marco teórico que sustenta la investigación a través del análisis de los trabajos precedentes y los principales fundamentos teóricos asociados con los colectores solares de placa plana.
- Obtener el procedimiento teórico que permita la selección de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares para las condiciones de la Ciudad de Guayaquil.
- Evaluar de forma experimental un colector solar de placa plana en viviendas unifamiliares, considerando las características del sistema de distribución de agua y la radiación solar incidente, en la Ciudad de Guayaquil.
- Realizar propuesta aplicable en el calentamiento de agua para viviendas unifamiliares mediante el uso de colectores solares de placa plana, considerando las principales variables del proceso de calentamiento del fluido.

### **Formulación de la hipótesis**

La evaluación teórica- experimental de un colector solar de placa plana para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil, a partir de los parámetros de captación de la energía solar, permitirá reducir el consumo energético de la vivienda en un 10 % y conocer los valores de eficiencia en el proceso de captación.

**Variables independientes**

- Radiación del sol
- Angulo de inclinación.
- Parámetros de diseño.

**Variable dependiente**

- Eficiencia térmica de un colector solar de placa plana

**Alcance de la investigación**

El alcance de la investigación está dada en el análisis de la eficiencia térmica del colector solar de placa plana para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares en función de la radiación solar incidente, ángulo de inclinación y parámetros de diseño del colector.

**Objeto de estudio**

Los colectores solares de placa plana

**Campo de acción**

El proceso de calentamiento de agua mediante el uso de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares.

**Técnicas y métodos de investigación empleados**

- **Método histórico-lógico** para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.
- **Método inductivo-deductivo** para el establecimiento de las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares.
- **Investigación documental y bibliográfica** para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionados con el objeto de estudio.

- **Investigación experimental** para describir y caracterizar el proceso estudiado y sus principales regularidades.
- **Técnicas computacionales** para el procesamiento estadístico de los datos experimentales, la validación de las expresiones matemáticas obtenidas y la creación de los gráficos de comportamiento del proceso de calentamiento de agua en viviendas unifamiliares.

## **CAPÍTULO I: MARCO DE REFERENCIA**

### **1.1. Marco Teórico**

#### **1.1.1. Evaluación térmica de los calentadores solares**

La utilización de modelos para la evaluación térmica es una herramienta muy empleada para predecir el comportamiento de sistemas reales. La ventaja de utilizar estos modelos, es la rapidez con que se puede conocer el comportamiento de un sistema, además de reducir el costo comparado con los datos obtenidos en las pruebas con sistemas experimentales. Otra ventaja es la facilidad para cambiar los parámetros de diseño y dimensionado.

Olivares et al. (2010), presentan un software para determinar en forma experimental y teórica las temperaturas para un colector solar plano y su implementación matemática en una herramienta computacional para la optimización del diseño y concluyen que se pueden utilizar materiales de baja conductividad térmica como absorbedores.

Smith et al. (1977) presentaron un método para conocer experimentalmente los tres factores que determinan la eficiencia del colector en la ecuación de Hottel – Whillier-Bliss, estos tres factores son: factor de remoción del calor del colector, el producto efectivo transmitancia-absortancia y el coeficiente global de pérdidas de calor. El colector que construyeron está compuesto de tubos unidos a una placa absorbente de aluminio, la cubierta está formada por dos vidrios de alta resistencia con un espesor de 3,17 mm, el aislante es de bajo coeficiente de conductividad térmica y está contenido en una caja de aluminio, y el fluido utilizado es una mezcla de agua con etilenglicol. Los autores realizaron mediciones de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura del fluido a la entrada y salida del colector. La medición de los factores de diseño se llevaron a cabo de la siguiente manera: el producto transmitancia-absortancia se determinó como una función del ángulo de incidencia usando piranómetros. El producto

factor de remoción-transmitancia-absortancia fue determinado considerando que las pérdidas de calor son cero. El producto factor de remoción-coeficiente de pérdidas globales se determinó considerando la radiación solar igual a cero. De las comparaciones de los datos experimentales con los teóricos, los autores obtuvieron los siguientes resultados: el valor del producto transmitancia-absortancia teórico de 0.729 y el experimental de 0.704, el factor de remoción teórico de 0.882 y el experimental de 0.886 y el coeficiente de pérdidas globales teórico de 3.7 y el experimental de 3.6. los autores concluyeron que los resultados fueron satisfactorios.

El tamaño de los segmentos de flujos es determinado principalmente por el paso de tiempo de la simulación y el flujo másico. Sin embargo, cuando el fluido proveniente del colector es más frío, que el contenido en la parte superior del tanque, ocurre un flujo inverso. Un modelo que describe al flujo inverso fue incorporado a los modelos multinodo y flujo tapón en el programa TRNSYS. Los autores concluyeron que el modelo multinodo requiere de pocos nodos, mientras que el modelo de flujo tapón es un método mas eficiente.

Kalogirou et al. (2000) validaron un modelo realizado en TRNSYS utilizando un sistema de calentamiento de agua termosifónico experimental. El sistema experimental consistió en dos colectores de placa plana conectados en paralelo con un área de apertura total de 2.7 m<sup>2</sup> y un tanque de almacenamiento con capacidad de 150 litros. Durante el desarrollo de las pruebas, las condiciones ambientales fueron medidas y registradas cada 10 minutos e integradas para cada hora. Las temperaturas del agua en el tanque de almacenamiento fueron medidas y registradas al comienzo y al final del día y fueron utilizadas para la validación del modelo. El sistema se dividió en un número de nodos y se le aplicó la ecuación de Bernolli para flujo incompresible en cada nodo, el flujo másico se obtuvo

mediante el acoplamiento y solución de las ecuaciones. Con base en los resultados experimentales y teóricos obtenidos, los autores concluyeron que el porcentaje de error fue 4.68 %, lo que se consideró satisfactorio.

### **1.1.2. El Sol Como Fuente De Energía**

El sol es una esfera, de unos 700.000 Km. de radio, constituida por una mezcla de gases compuesta, fundamentalmente, por un 70% de hidrógeno y un 27% de Helio. En el núcleo del sol se producen continuamente reacciones nucleares de fusión que son la fuente de su energía. Esta energía fluye hacía capas externas y hacía el espacio por mecanismos de convección y radiación. Desde el punto de vista de su aprovechamiento energético podemos considerarlo como una esfera que emite una radiación, que transmite a través del espacio a la velocidad de la luz, que se distribuye en una banda de longitudes de onda equivalentes a la de un cuerpo negro a 6.000 °K. La energía radiante del sol que se recibe en el exterior de la atmósfera terrestre es la denominada constante solar y vale: 4.872 KJ/h.m<sup>2</sup>

El sol es una fuente inagotable de energía, debido a la fusión de átomos de deuterio que producen átomos de helio. Es sorprendente el hecho que la irradiación solar en tan solo un segundo, es mucho mayor a toda la energía consumida por la humanidad. Una parte de toda esta energía llega a la tierra en forma de radiación electromagnética, compuesta de rayos de diferentes longitudes de onda, que viajan a una velocidad de  $3 \times 10^5$  km/s; la otra parte irradia el exterior de la atmósfera con una potencia de  $1,73 \times 10^{14}$  kW. El sol visto desde la tierra, rota alrededor de su eje cada cuatro semanas y tiene una edad estimada de 5 mil millones de años; tiene un diámetro de  $1,39 \times 10^9$  m y está situado a  $1,5 \times 10^{11}$  m de distancia a la tierra, que equivale a 8 minutos de trayecto a velocidad luz (Plana I. M., J.R. Polo, J.L. Rosell, 2005).

### 1.1.3. Radiación Solar Terrestre

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infraroja y ultravioleta). En el sol existe una fusión nuclear, donde el hidrógeno se convierte en helio a una temperatura de 5000 a 5800 grados centígrados en la superficie solar, este calor al llegar a la tierra lo hace con una energía de aproximadamente  $1365 \text{ W/m}^2$  para ser aprovechada. La energía solar al pasar las diferentes capas de la atmósfera, se ve expuesta a diferentes fenómenos (absorción, reflexión y refracción); llegando a la superficie terrestre en forma efectiva entre  $100$  y  $400 \text{ W/m}^2$  como muestra la figura.

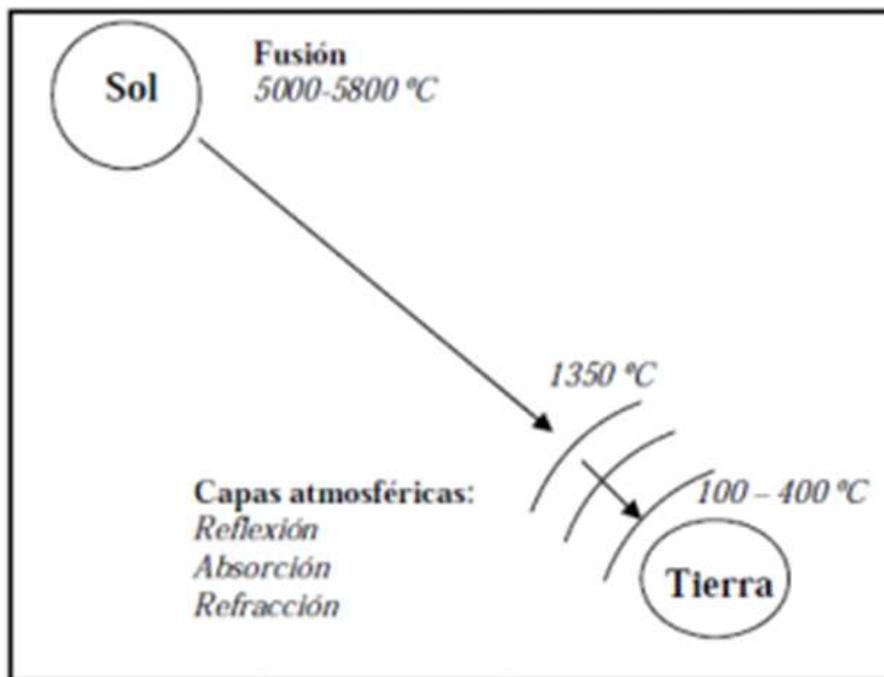


Figura 1.1. Radiación solar (Fuente: Plana et al, 2005)

La energía solar que alcanza la superficie de la tierra es muy irregular variando no tan solo su insolación máxima diaria sino también la radiación solar que se atenúa según la composición instantánea de la atmósfera que atraviesa, siendo así, que solo el 47 % de la radiación incidente sobre la atmósfera terrestre alcanza la superficie de la tierra, un 31 % lo hace directamente y el 16% después de ser dispersada por polvo, vapor de agua y

moléculas de aire. El 53 % de energía restante es reflejada al espacio o absorbida por la atmósfera.

**Heliofanía:** representa la duración del brillo solar u horas de sol, y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliófanógrafo, registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa. La ocurrencia de nubosidad determina que la radiación recibida por el instrumento sea radiación solar difusa, interrumpiéndose el registro. por tanto, si bien hay energía incidente disponible, la concentración o densidad de la misma no es suficiente para ser registrada. A pesar de lo expresado, la duración del brillo solar está muy relacionada con la radiación solar global incidente.

**Irradiancia y constante solar:** La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como irradiancia ( $I_s$ ). Esta magnitud se expresa en  $W/m^2$ . Se conoce como constante solar ( $S_s$ ) al valor de la irradiancia en un plano exterior a la atmósfera y perpendicular a los rayos del sol para una distancia media tierra –sol. Según mediciones hechas por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) el valor de la constante es de  $1,3535 W/m^2$ .

**Componentes de la radiación:** Los distintos constituyentes de la atmósfera tales como gases, nubes y partículas sólidas en suspensión atenúan la radiación solar debido a distintos procesos de absorción, reflexión y refracción que sufre ésta al momento que atraviesa la masa de aire.

#### **Componentes de la radiación solar**

- Radiación estratosférica fuera de la atmósfera
- Radiación directa: Es aquella que incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo de incidencia. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

- Radiación difusa o dispersa: Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación, que se denomina difusa, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones no solo de las nubes, sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, entre otros. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.
- Radiación reflejada: es, como su nombre lo indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. Una superficie inclinada puede recibir, además, la radiación reflejada por el terreno o por espejos de agua o por otras superficies horizontales, fenómeno conocido como **albedo**.

Las proporciones de radiación directa, dispersa y albedo recibida por una superficie dependen:

- De las condiciones meteorológicas
- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal
- De la presencia de superficies reflectantes

En función del lugar varía también la relación entre la radiación dispersa y la total, ya que al aumentar la inclinación de la superficie de captación disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada. Por ello, la inclinación que permite maximizar la energía recogida puede ser diferente dependiendo del lugar.

**Radiación global:** Es la suma de las tres radiaciones, si se llama  $I_D$  a la radiación directa,  $I_s$  a la dispersa y  $R$  a la reflejada, la radiación solar total que cae sobre la superficie es:  $I_T = I_D + I_s + R$ .

En un día despejado con cielo limpio la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la

totalidad de la radiación que incide es difusa. Los distintos tipos de colectores solares aprovechan de forma distinta la radiación solar. Los colectores solares planos captan la radiación total (directa + difusa), sin embargo, los colectores de concentración suelen situarse en zonas de muy poca nubosidad y con pocas brumas en el interior, alejados de las costas. Los colectores solares planos pueden colocarse en cualquier lugar, siempre que la insolación sea suficiente.

#### **1.1.4. Equipos fundamentales que integran la captación térmica de la energía solar**

Se entiende por captación térmica de la energía solar al procedimiento de transformación de la energía radiante del sol en calor o energía térmica. Se refiere a aplicaciones de la energía solar a baja temperatura cuando la energía térmica que se obtiene se utiliza con valores de temperaturas inferiores a 80 °C. Se obtiene a partir del sol una energía que puede ser utilizada en aplicaciones térmicas: calentar agua sanitaria, usos industriales, calefacción de espacios, calentamiento de piscinas, secaderos, entre otros.

Los colectores solares son dispositivos utilizados para coleccionar, absorber y transferir energía solar a un fluido, que puede ser agua o aire. La energía solar, puede ser utilizada para calentar agua, para sistemas de calefacción o para climatización de piscinas. Desde su primera invención, hace 120 años, se han desarrollado diversas formas de colectores solares térmicos, que van de los colectores planos a los colectores parabólicos y helióstatos. Se estima que en todo el mundo, el área instalada de colectores solares supera los  $58 \times 10^6 \text{ m}^2$ . En Ecuador el uso de colectores solares con este fin es muy bajo en contraste con otros países como los europeos y China

Para calentar agua a temperatura media, para calefacción de espacios y para procesos industriales, las aplicaciones más utilizadas son los colectores planos, en los cuales el área

de la superficie absorbedora es la misma que el área total del colector; o tubulares, en los que el absorbedor se encuentra dentro de un tubo de vidrio al vacío. Estos últimos pueden incluir, ya sea dentro o fuera del tubo, espejos cilindro-parabólicos para centrar la energía solar en el absorbedor.

Temperaturas de 40 a 70 °C son alcanzadas fácilmente por los colectores planos; el uso de superficies selectivas y reflectores junto a la retención de calor, hace que los colectores de tubos de vacío alcancen temperaturas significativamente más elevadas. Un colector necesita ser seleccionado cuidadosamente de acuerdo a la temperatura del fluido que debe proporcionar, para la aplicación prevista y de acuerdo al clima del lugar en el cuál va a estar emplazado. Un colector diseñado para aplicaciones en las que se necesitan fluidos a alta temperatura no resulta más eficiente cuando operan a bajas temperaturas.

### **Colectores de placa plana con cubierta**

Los colectores de placa plana son los más usados para calentar agua en los hogares y para los sistemas de calefacción. Un colector de placa plana se compone básicamente de una caja metálica con aislamiento con una cubierta de vidrio o de plástico (la ventana) y de una placa absorbedora de color oscuro. La radiación solar es absorbida por la placa que está construida de un material que transfiere rápidamente el calor a un fluido que circula a través de tubos en el colector (Figura 1.2).



*Figura 1.2. Colector solar de placa plana (Fuente: Bértiz L. y M. Álvarez, 2008)*

Este tipo de colectores, calientan el fluido que circula a una temperatura considerablemente inferior a la del punto de ebullición del agua y son los más adecuados para aplicaciones donde la demanda de temperatura es de 30-70 °C. Son los más utilizados para calentar agua en sistemas domésticos y comerciales y en piscinas cubiertas.

Un colector de placa plana consiste en un absorbedor, una cubierta transparente, un marco, y aislación. La cubierta transparente transmite una gran cantidad de la luz de onda corta del espectro solar y al mismo tiempo, sólo deja pasar muy poca radiación de onda larga (calor emitido por el absorbedor) produciendo un efecto invernadero. Además, la cubierta transparente evita que el viento y las brisas se lleven el calor colectado (convección). Junto con el marco, la cubierta protege el absorbedor de las condiciones meteorológicas adversas. Típicamente el marco está fabricado de materiales de aluminio y de acero galvanizado, también se utiliza plástico reforzado con fibra de vidrio.



Figura 1.3. Partes fundamentales de un colector solar de placa plana (Fuente: Bértiz L. y M. Álvarez, 2008)

La aislación en la parte posterior del absorbedor y en las paredes laterales reduce las pérdidas de calor por conducción. Esta aislación es por lo general de la espuma de poliuretano, lana mineral, fibra de lana de vidrio, entre otros. Estos colectores demostraron poseer una muy buena relación precio/calidad y tienen una amplia gama de posibilidades para su montaje (en el techo, como parte del techo, o solos).

### **Colectores concentradores parabólicos compuestos (CPC) estacionarios**

Estos colectores poseen un sistema de concentración de radiación solar tipo Concentradores Parabólicos Compuestos, para obtener temperaturas más elevadas y un mayor rendimiento. Estas características se deben a que el área de pérdidas es menor al área de colección logrando una minimización de las pérdidas y alcanzando un rendimiento cercano al 50 %. Son colectores concentradores, de alto rendimiento y alta calidad, de patente portuguesa.

### **Colectores de placa plana sin cubierta**

Este tipo de colectores, sencillos y baratos, consisten en un absorbedor pero carecen de la cubierta transparente. No incluyen ningún aislamiento adicional, de manera que la ganancia de temperatura queda limitada a unos 20 °C sobre la del aire del ambiente, son los más adecuados para aplicaciones de baja temperatura. Actualmente, son utilizados para la calefacción de piscinas al aire libre, pero existen otros mercados, incluidos los de calefacción de temporada en las piscinas cubiertas, calefacción de agua para lavar coches, y calefacción del agua utilizada en piscicultura. También existe un mercado potencial de estos colectores para calentamiento de agua en lugares remotos, como campamentos de verano.

Los absorbedores de estos colectores son generalmente de plástico negro tratado para resistir la luz ultravioleta, o están contruidos por tubos de metal o plástico recubiertos de pigmentos ennegrecidos por los que circula el agua. Dado que estos colectores no tienen cubierta, una gran parte de la energía solar absorbida se pierde principalmente por convección.

### **Colectores de tubos de vacío**

Estos colectores se componen de un conjunto de tubos de vacío (o evacuados) cada uno de los cuales contienen un absorbedor (generalmente una plancha de metal con tratamiento selectivo o de color negro), el cual recoge la energía solar y la transfiere a un fluido portador (calo-portador). Gracias a las propiedades aislantes del vacío, las pérdidas de calor son reducidas y pueden alcanzarse temperaturas en el rango de 77 °C a 177 °C. De esta manera, este tipo de colectores resultan particularmente apropiados para aplicaciones de alta temperatura.

Por su forma cilíndrica, aprovechan la radiación de manera más efectiva que los colectores planos, al permitir que los rayos de sol incidan de forma perpendicular sobre los tubos durante la mayor parte del día. Estos colectores son hasta unos 30 % más eficientes que los colectores planos, pero son bastante caros, por unidad de superficie suelen costar aproximadamente el doble que un colector de placa plana. En los últimos años, China ha perfeccionado la construcción de este tipo de colectores a precios competitivos con los colectores planos y ha entrado a competir con éxito en el mercado mundial. En la actualidad, China está produciendo el 70 % de los colectores usados a nivel mundial. Están bien adaptados para aplicaciones industriales de calefacción y también puede ser una alternativa eficaz a los colectores de placa plana para la calefacción doméstica, especialmente en regiones donde hay poca radiación o escasa heliofanía.

La técnica de vacío utilizada por los fabricantes de tubos fluorescentes, entre otros, se ha desarrollado hasta el punto de hacer rentable la producción en masa y la comercialización de sus equipos. Mediante la aplicación de esta tecnología, ha sido posible la construcción de los colectores solares de vacío que se comercializan en la actualidad y el mantenimiento de su elevado vacío. Debido a sus características geométricas, reciben el nombre de colectores de tubos de vacío. Existen dos tipos de colectores tubulares de vacío, según sea el método empleado para el intercambio de calor entre la placa y el fluido caloportador: de flujo directo y con tubo de calor.

### **De flujo directo**

Estos consisten en un grupo de tubos de vidrio dentro de cada uno de los cuales hay una aleta de aluminio absorbedor, conectada a un tubo de metal (normalmente cobre) o tubo de vidrio. La aleta posee un recubrimiento selectivo que absorbe la radiación solar, e inhibe la pérdida de calor radiactivo. El fluido de transferencia de calor es el agua y se distribuye a

través de las tuberías, una para la entrada del líquido y el otro para la salida de fluidos. Los colectores de tubos de vacío de corriente directa vienen en varias variedades de acuerdo al tipo de tubería utilizada.

- Fluido concéntrico de entrada y salida (vidrio-metal). Estos utilizan un único tubo de vidrio. Dentro de este está la tubería de cobre adosada a la aleta. Este tipo de construcción permite que cada una de las tuberías roten para otorgar el ángulo de inclinación deseado y permitir la máxima absorción en la aleta, aun cuando el colector se monta horizontalmente. El diseño de vidrio y metal es eficiente, pero pueden tener problemas, las diferentes tasas de expansión térmica del vidrio y los tubos de metal pueden hacer que la juntura entre ellos se debilite y provocar una pérdida de vacío. Sin el vacío, la eficiencia de estos colectores no es mejor, y puede ser peor que la de un colector de placa plana.
- Tuberías de entrada y salida separadas (vidrio-metal). Este es el tipo tradicional de colectores de tubos de vacío. El absorbedor puede ser plano o curvo. Como en el caso del diseño de tubos concéntricos, la eficiencia pueden ser muy elevados, sobre todo cuando se requieren temperaturas de trabajo relativamente bajas. La posible pérdida de vacío después de algunos años de funcionamiento vuelve a ser el inconveniente.
- Dos tubos de vidrio fundido juntos en un extremo (vidrio-vidrio). El tubo interior está revestido con un absorbedor integrado cilíndrico de metal. En general no son tan eficientes como los tubos de vidrio-metal, pero son más baratos y tienden a ser más confiables. Para aplicaciones de muy alta temperatura, los tubos de vidrio-vidrio pueden ser más eficientes que sus homólogos de vidrio y el metal.

### Con Tubo de Calor

En este sistema los tubos de vacío llevan un fluido vaporizante que no puede salir del interior del tubo y que funciona como caloportador. Este fluido se evapora por efecto de la radiación solar, asciende hasta el extremo superior del tubo que se encuentra a temperatura inferior, esto hace que el vapor se condense, ceda su energía y retorne a su estado líquido cayendo por acción de la gravedad a la parte inferior del tubo, donde al recibir más radiación, vuelve a evaporarse y comienza un nuevo ciclo.

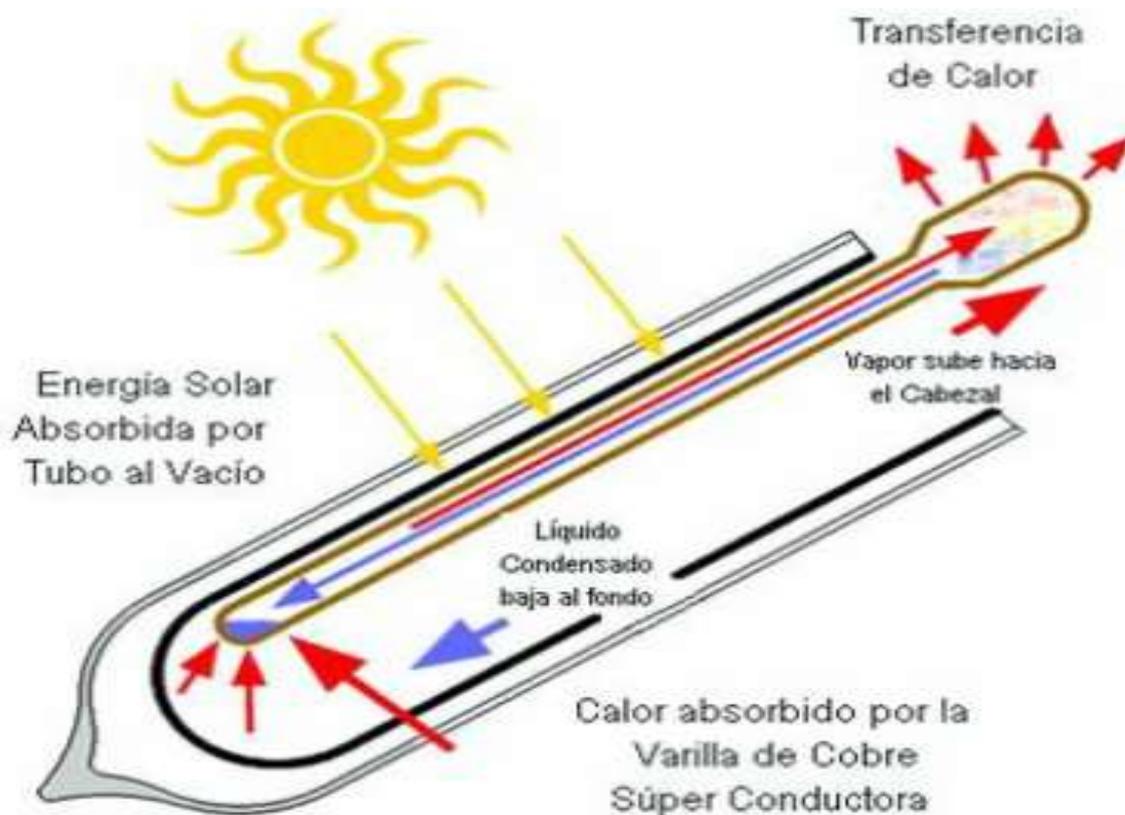


Figura 1.4. Funcionamiento del Tubo de Calor (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)

Los tubos de calor son considerados como los “superconductores” del calor, debido a su muy baja capacidad calorífica y a su excepcional conductividad (miles de veces superior a la del mejor conductor sólido del mismo tamaño). El uso del tubo de calor está muy extendido en la industria y, basándose en este principio de funcionamiento se fabrican los actuales colectores de vacío con tubo de calor (figura 1.4).

Una ventaja del sistema de tubos de calor sobre el de flujo directo es la conexión "seca" entre el absorbedor y la cabecera, lo que hace más fácil la instalación y también significa que los tubos se pueden cambiar sin vaciar el fluido de todo el sistema. Un inconveniente de estos colectores con tubos de calor es que deben ser montados con un ángulo mínimo de inclinación de alrededor de  $25^\circ$  con el fin de permitir que el fluido interno de la tubería de calor retorne a la zona de absorción de calor, en cambio los de flujo directo pueden ser instalados de manera horizontal.

### **2.1.5. Criterios para la selección de un colector. Eficiencia del colector**

El rango de temperaturas deseadas para el fluido que se calienta es el factor más importante cuando se elige el tipo de colector. Un absorbedor descubierto, no será apto para obtener temperaturas elevadas. La cantidad de radiación del lugar, la exposición a tormentas y granizo, y la cantidad de espacio que se necesita, deben ser cuidadosamente examinadas cuando se planifica un sistema solar. Los costos específicos de los colectores también son importantes. Los tubos colectores al vacío son sustancialmente más caros que los colectores de placa plana. Un buen colector no garantiza un buen sistema solar.

#### **Eficiencia del colector**

La eficiencia de un colector solar se define como el cociente de la energía térmica útil frente a la energía solar total recibida. Además de las pérdidas térmicas existen las pérdidas ópticas. El factor de conversión u eficiencia óptica indica que porcentaje de los rayos solares que penetran en la cubierta transparente del colector (la transmisión) es absorbido. Básicamente, es el producto de la tasa de transmisión de la cubierta y la tasa de absorción del absorbedor. En la tabla 1.1 se muestran valores típicos de los parámetros característicos de eficiencia óptica ( $\eta_0$ ) y coeficiente global de pérdidas ( $U_L$ ) y rango normal de temperaturas de trabajo para distintos tipos de colectores.

*Tabla 1.1 Valores típicos de los parámetros característicos de eficiencia y coeficiente global de pérdidas*

Tipo de Colector	Factor de Conversión ( $\eta_0$ )	Factor de Pérdidas Térmicas U (W/m °C)	Rango de Temperatura (°C)
Sin Cubierta	0,9	15 -25	10 - 40
Cubierta Simple	0,8	7	10 - 60
Cubierta Doble	0,65	5	10 - 80
Superficie Selectiva	0,8	5	10 - 80
Tubos de Vacío	0,7	2	10 - 130

#### **1.1.6. Características de los circuitos en el calentamiento del agua a baja temperatura**

El sistema más simple para aprovechar la energía calorífica del sol (radiación infrarroja) es la instalación de un colector solar plano, en el cual se hace pasar agua en el serpentín de cobre para aumentar la temperatura del agua por medio de la radiación incidente. Esta agua es usada principalmente para fines de uso doméstico y sanitario. Estos sistemas aumentan la temperatura del agua hasta 80°C aproximadamente. Por otra parte el agua calentada requiere ser transportada a un sistema de almacenamiento, de manera que tenga la capacidad de mantener la temperatura del agua hasta que sea utilizada. Las instalaciones para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) se pueden clasificar en: circuitos abiertos y circuitos cerrados.

### Circuitos abiertos

El agua que circula por los colectores se usa directamente para el consumo. Estas instalaciones no disponen de intercambiador quedando su aplicación limitada por factores tales como la calidad del agua o la existencia de heladas estacionales (figura 1.5).

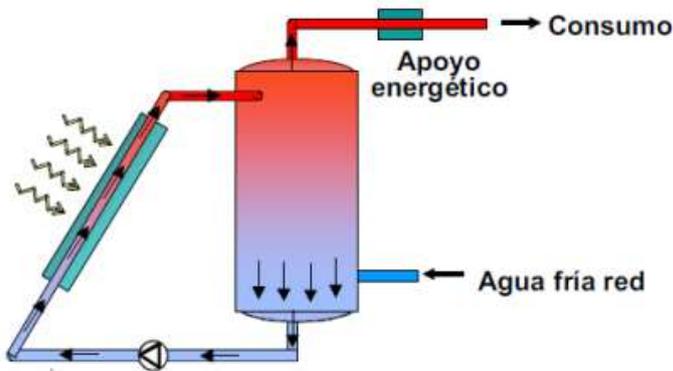


Figura 1.5. Circuito abierto para colectores solares (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)

### Circuitos cerrados

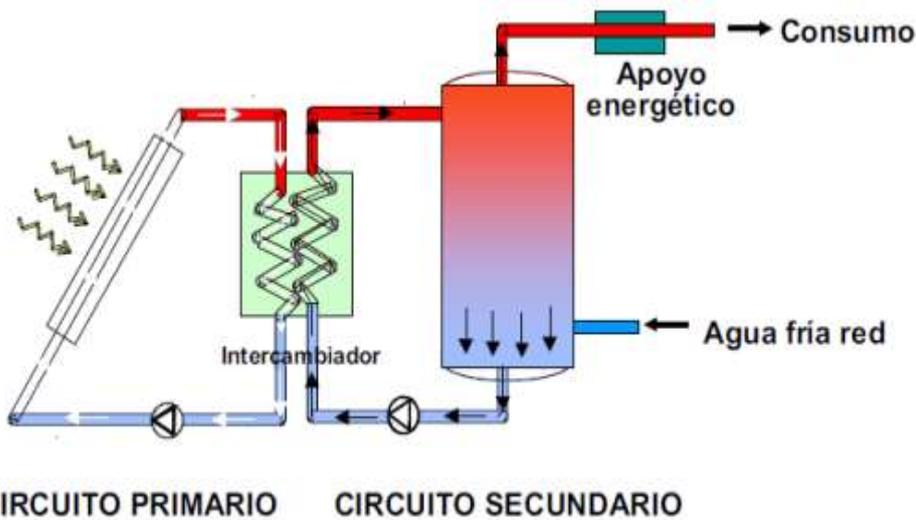


Figura 1.6. Circuito cerrado para colectores solares (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)

Se observan dos circuitos diferentes. El circuito primario está formado por los colectores donde se produce el calentamiento del agua y por la bomba de impulsión. Esta agua cede

su calor por medio de un intercambiador al agua que circula por el circuito secundario, siendo éste agua la que es almacenada en el acumulador. Como elemento independiente del depósito de acumulación además de la bomba del circuito secundario, se encuentra la fuente energética auxiliar, que entra en funcionamiento cuando la temperatura del agua de salida del acumulador es inferior a los requerimientos de la demanda (figura 1.6).

### **Partes principales de un sistema de baja temperatura**

Las instalaciones de baja temperatura requieren para su funcionamiento el acoplamiento de tres subsistemas principales:

- Subsistema de captación: cuya finalidad es la captación de la energía solar.
- Subsistema de almacenamiento: cuya finalidad es adaptar en el tiempo la disponibilidad de energía y la demanda, acumulándola cuando está disponible, para poderla ofrecer en cualquier momento en que se solicite.
- Subsistema de distribución y consumo: cuya finalidad es trasladar a los puntos de consumo el agua caliente producida.

El funcionamiento de los tres subsistemas está condicionado, fundamentalmente por la radiación solar y temperatura, así como por la demanda.

### **Subsistemas de Captación**

El subsistema de captación está constituido por el colector solar que es un dispositivo utilizado para colectar, absorber y transferir energía solar a un fluido, que puede ser agua o aire. Comúnmente los colectores solares son clasificados de la siguiente forma:

- Colectores de placa plana (Flat plate collectors)
- Colectores Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) Estacionarios
- Colectores de tubos de vacío (Evacuated-tube collectors)

### **Subsistema de almacenamiento**

El sistema de almacenamiento de los calentadores de agua se encuentra unido al colector solar. A este depósito de almacenamiento se le conoce con el nombre “termotanque solar”; este recipiente de almacenamiento es conectado con la entrada y la salida del colector. Durante el día, el agua se recircula una y otra vez entre el colector y el contenedor. Después de un tiempo y dependiendo de las dimensiones de los componentes, el agua se calentará para su uso posterior. La energía capturada en el colector se guarda en el tanque en forma de agua caliente. En el momento de requerir agua, se extrae del tanque y se rellena con agua fría. El tanque está aislado térmicamente para evitar pérdidas y mantener caliente el agua por más tiempo. En un sistema doméstico, el contenedor suele incorporar un calentador eléctrico de apoyo, que se activará en caso de no alcanzar la temperatura deseada. Este tanque consta de un cilindro interno de acero inoxidable, el cual tiene una envolvente de lana mineral y poliuretano de alta densidad (aislantes térmicos), finalmente tiene una envolvente de acero. En los calentadores solares de albercas o piscinas, el contenedor suele ser la alberca misma, y la caja aislante del colector puede no ser necesaria debido a la escasa diferencia entre la temperatura de trabajo (temperatura del agua) y la temperatura ambiente. Pueden encontrarse en el mercado otros tipos distintos de almacenadores para agua caliente, aunque en instalaciones pequeñas o medianas es recomendable la utilización del termotanque.

### **Subsistema de distribución y consumo**

Las instalaciones de energía solar térmica han de incluir necesariamente una serie de elementos indispensables para el correcto funcionamiento y control de la instalación. Algunos de ellos son obligatorios, puesto que se trata de elementos de seguridad, y otros se colocan para obtener un mejor rendimiento de la instalación y correcto mantenimiento

(válvulas de paso, válvulas de seguridad, manómetro, termómetro, entre otros). En las instalaciones solares térmicas de baja temperatura para que la transferencia térmica sea eficaz, se debe asegurar la circulación del fluido. Esto se puede conseguir de dos formas diferentes, por termosifón (circulación natural) y mediante una bomba de circulación (circulación forzada).

### **Circulación natural o por termosifón**

El propio fluido se mueve por la diferencia de temperatura que se crea entre el agua fría del tanque y la caliente del colector. Esto se explica gracias a que el agua calentada por el sol disminuye su densidad y, por tanto, su peso, por lo que el mayor peso del agua fría del depósito (situado necesariamente por encima de los colectores), sale por el conducto situado en su parte inferior, el cual está conectado con la tubería de entrada a los colectores, empujando de esta forma el agua caliente del colector por la tubería de salida hacia la parte superior del depósito. Una vez calentada el agua del depósito, ambas temperaturas se igualan por lo que el movimiento cesa, no reanudándose hasta que haya un consumo de agua, por lo que entra en el depósito agua fría de la red disminuyendo la temperatura del tanque acumulador.

Estos sistemas presentan como características su simplicidad, eficiencia y seguridad, además de un coste bajo. Como desventajas se pueden enumerar las siguientes:

- Depósito acumulador siempre por encima de los paneles solares, por lo que dificulta la integración estética.
- Caudal circulante pequeño.
- No se puede limitar la temperatura del agua por lo que en verano puede alcanzar valores elevados.

- Necesidad de una mínima carga hidráulica, diferencia de alturas entre el depósito y los paneles.
- Tuberías de mayor tamaño para reducir las pérdidas.
- Necesidad de un purgador o vaso de expansión.
- Necesidad que en el circuito de colectores no exista algún material contaminante.
- Todos los circuitos trabajan a la presión de la red.
- No se puede usar anticongelantes para prevenir la congelación del fluido.
- Mayores riesgos de corrosión por alto contenido de aire en el agua de red.
- Posibilidad de incrustaciones calcáreas y de suciedad en el circuito, por la continua renovación de agua.

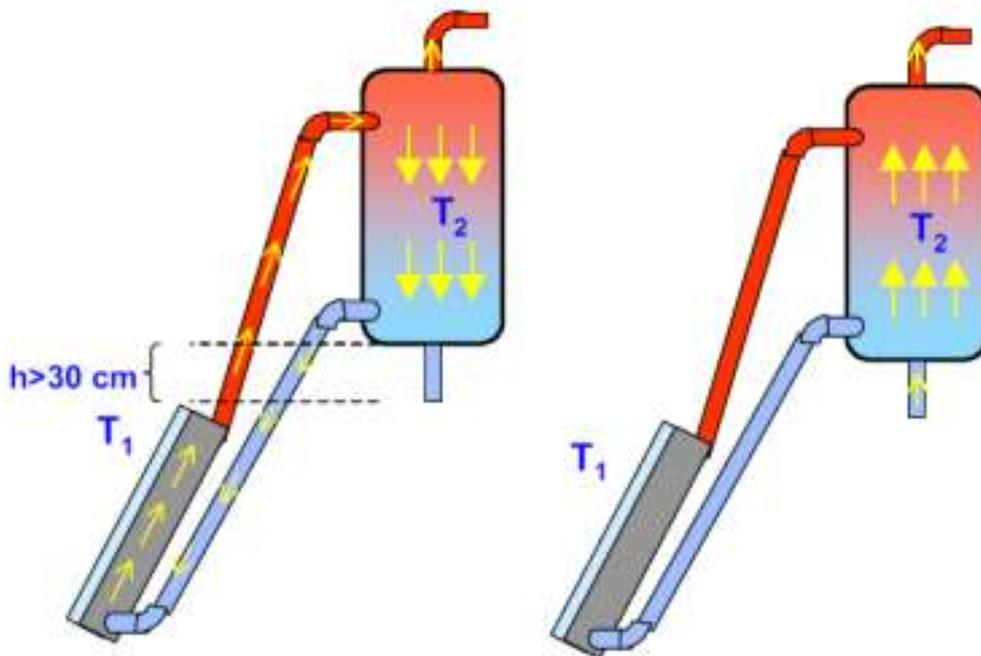


Figura 1.7. Circulación por termosifón (Fuente: Bérriz L. y M. Álvarez, 2008)

Cuando se produce una extracción de agua caliente, el depósito se rellena con agua de la red (figura 1.7), la temperatura del tanque baja y el movimiento se reinicia por sí mismo. Es básico en un sistema por termosifón, que el diseño y montaje de la instalación favorezca

el movimiento del agua caliente. Dos son los factores que influyen en la fuerza ascensional del agua:

- La diferencia media de temperaturas del agua a la salida del colector y en la parte baja del depósito.
- Diferencia de alturas  $h$  entre el tanque y los colectores (mínimo 30 cm.) Tiene la gran ventaja de ser más sencillo, pues carece de bomba de circulación correspondiente. Se suele comercializar como equipos compactos.

Esta solución es la más simple y la que proporciona mejor rendimiento térmico, al no existir pérdidas por la existencia de un intercambiador de calor.

### **Circulación Forzada**

Para evitar los inconvenientes de la instalación con circulación por termosifón, la circulación del agua puede conseguirse introduciendo una bomba que hace circular el agua de forma forzada, lo cual permite regular mejor la instalación. La bomba de circulación de una instalación pequeña (colector de 4 m<sup>2</sup>, depósito de 200 litros) tiene una potencia relativamente pequeña, de unos 15 a 20 vatios. El captador y el depósito pueden adoptar la posición relativa que convenga, es decir, que pueden estar al mismo nivel (figura 1.8).

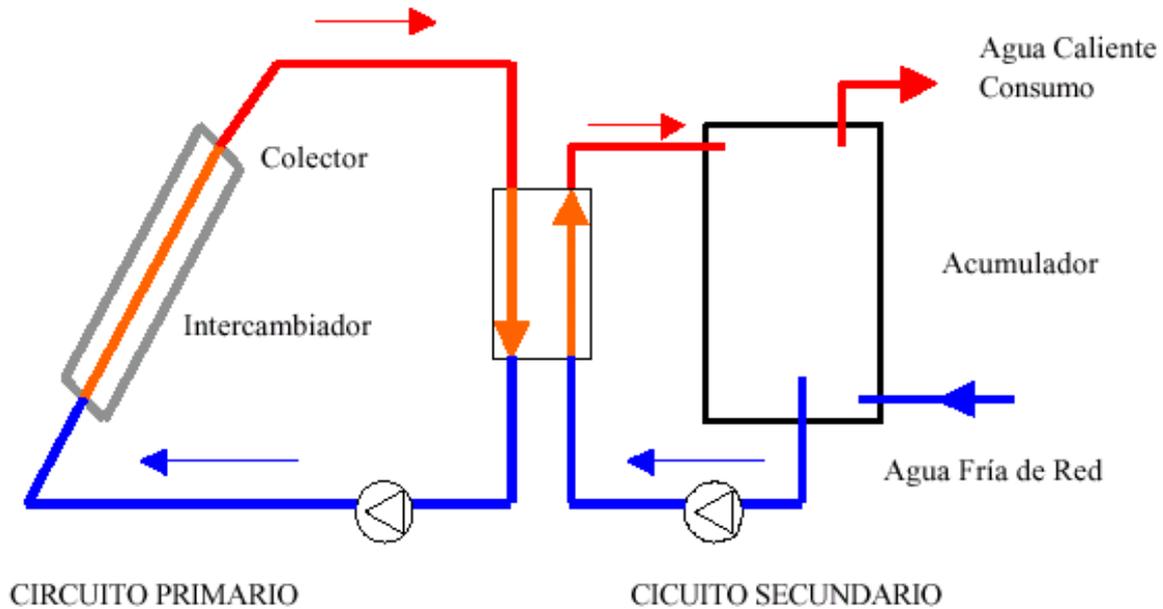


Figura 1.8. Circulación forzada del fluido (Fuente: Bérriz L. y M. Álvarez, 2008)

Existe un intercambiador térmico, por lo que el fluido que atraviesa los paneles solares no es la de consumo. De este modo no existe peligro de contaminación de las aguas, se puede usar anticongelantes, y la presión es menor. Al no renovarse el agua en el circuito primario no aumentan las incrustaciones calcáreas, ni la suciedad y si está bien sellado la oxidación.

Como desventaja presenta:

- Necesidad de disponer de energía eléctrica, la cual se podría paliar con la instalación de paneles fotovoltaicos, pero esto encarecería la instalación.
- Necesidad de regulación y control del fluido para que este se ponga en movimiento.
- Incremento en los costes de la instalación.
- Mayor complejidad.

En ambos casos, circulación natural y forzada pueden tener dos circuitos totalmente independientes entre sí y unidos mediante un intercambiador de placa o de tubo.

Es posible que, aunque se use un intercambiador exterior, la circulación en el primario pueda ser termosifónica, aunque lo normal es que sea acelerada por una bomba, ya que

para que el intercambio sea eficaz se requiere un caudal mínimo en el intercambiador que difícilmente se podrá conseguir con el simple efecto termosifón.

Se debe asegurar en todo caso que el primario resista la presión de la red, por si ocurre una avería en el intercambiador y se establece una comunicación entre el primario y el secundario.

## **1.2. Marcos temporal**

Este proyecto de investigación se desarrolló en la PROVINCIA DE GUAYAS, con el propósito de evaluar de forma teórica y experimental los colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares en la Ciudad de Guayaquil en el año 2016.

## **2.3. Marco Legal**

### **2.3.1. Normas legislativas y regulatorias en el Ecuador relacionadas con el uso de la energía solar**

En los últimos años, Ecuador ha tenido importantes cambios a nivel legislativo y regulatorio, en el 2008 se aprobó una nueva constitución que posee varios artículos los cuales sirven de apoyo a esta investigación, ellos son:

- Título II. Derechos. En el capítulo segundo relacionado con el derecho del buen vivir, en la sección segunda que aborda el ambiente sano. El artículo 15 plantea que el estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho del agua. En el capítulo séptimo, artículo 72 se esboza que la naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tiene el Estado y las personas naturales o

jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados.

- Título VII. Régimen del buen vivir. En el capítulo segundo relacionado con Biodiversidad y recursos naturales, en la sección primera. En el artículo 395 se plantea que el estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras. En el artículo 413 se expone que el Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

Es importante destacar la creación del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) en 2007; ministerio que tiene su origen en la Subsecretaría de Electricidad del antiguo Ministerio de Energía y Minas. Con la actual estructura administrativa, queda demostrado el interés del gobierno ecuatoriano en el sector de las energías renovables.

Hasta el momento, solo en el sector eléctrico existen normativas relacionadas con el uso de energías renovables:

- La Ley de Regulación del sector eléctrico (LRSE), data del año 1996 aunque ha tenido modificaciones posteriores, contiene las normas relacionadas con la estructura del sector y su funcionamiento. En el capítulo IX de la Ley se hace una mención específica sobre el fomento al desarrollo y uso de recursos energéticos no convencionales. Se establece este tipo de recurso energético como prioritario a la

hora de asignar los recursos relacionados con los Fondos de Electrificación Rural y Urbano Marginal (FERUM) a proyectos de electrificación rural. Además es el Consejo Nacional de Electrificación quien dictará las normas aplicables para el despacho de la electricidad producida con energías no convencionales tendiendo a su aprovechamiento y prioridad.

- El reglamento General de la Ley de Régimen del sector Eléctrico establece las normas y los procedimientos generales para la aplicación de la Ley de Régimen del sector Eléctrico, en la actividad de generación y en la prestación de los servicios públicos de transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, necesarios para satisfacer la demanda nacional, mediante el aprovechamiento óptimo de los recursos naturales. Es importante destacar, además, normativa de Electrificación rural y el marco regulatorio del sector eléctrico.

### **2.3.2. Normas internacionales para evaluar colectores solares**

A nivel internacional existen varias normas que permiten evaluar el comportamiento térmico de colectores solares. Para los colectores planos que utilizan agua como fluido de trabajo se utilizan las normas internacionales ISO 9806-1 e ISO 9806-3 referente a métodos de pruebas para colectores solares, y la norma internacional ANSI/ASHRAE 93-1986 referente a métodos de pruebas para determinar el desempeño térmico de colectores solares. Los tipos de colectores que pueden ser evaluados con estas normas son los que trabajan a bajas temperaturas ( $45^{\circ}\text{C}$ ) y medianas temperaturas ( $80^{\circ}\text{C}$ ).

Los procedimientos de pruebas propuestos, pueden realizarse en exteriores bajo condiciones climatológicas del lugar o en interiores utilizando un simulador de radiación solar. La evaluación térmica de colectores solares consiste en aplicar los tres procedimientos de prueba que especifican las normas, ellos son:

- Procedimiento para determinar la constante de tiempo en exteriores o interiores.
- Procedimiento para determinar la eficiencia térmica en exteriores o interiores.
- Procedimiento para determinar el ángulo de incidencia modificado en exteriores o interiores.

En el año 2002 el grupo de trabajo de Florida Solar Energy Center (Binotti et al, 2014) publicó el documento FSEC-CP-5-80 referente a métodos de pruebas y normas mínimas para la certificación de colectores solares. Los colectores solares que toman en cuenta son colectores encapsulados y colectores solares no encapsulados que se destinan para el calentamiento de espacios y el calentamiento de agua. El fluido de trabajo es agua o aire, dependiendo del tipo de colector solar. Los procedimientos que presenta coinciden con los mostrados por las normas anteriores.

La evaluación de funcionalidad de colectores solares consiste en aplicar 8 procedimientos de prueba en exteriores bajo las condiciones climatológicas del lugar. Las pruebas de funcionalidad son:

- Inspección a la recepción del colector solar
- Presión estática previa a la prueba de exposición de 30 días
- Exposición de 30 días
- Choque térmico con circulación de agua fría
- Presión estática posterior a la prueba de exposición de 30 días
- Desarmado e inspección final de los componentes del colector solar

## **CAPÍTULO II: METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

### **2.1. Ubicación geográfica y características de consumo de viviendas unifamiliares**

Para el diseño del sistema de calentamiento de agua es necesario conocer la ubicación geográfica del lugar donde se instalará el sistema, en este caso la ciudad de Guayaquil. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el régimen de uso del agua caliente, ya que puede variar debido a diversos factores. Por ejemplo, si una familia en la cual todos sus integrantes trabajan, el uso del agua caliente se hace al empezar el día o al terminar el mismo; sin embargo, en un baño comunitario, el uso del agua caliente se realiza durante todo el día, es decir conforme se produce el agua caliente, se consume. Estas dos formas de uso del agua caliente se denominan sistema puntual y sistema continuo respectivamente. El sistema continuo es más eficiente y menos costoso que el sistema puntual; esto se debe a dos condiciones: en el sistema continuo se utiliza un depósito de almacenamiento de menor capacidad, y la temperatura del agua almacenada es menor, por lo que las pérdidas de calor se reducen notablemente.

En este proyecto de tesis se desea diseñar un sistema de calentamiento de agua para satisfacer los requerimientos de agua de una familia de cinco personas en la ciudad de Guayaquil. La familia requiere del calentamiento de 40 litros de agua a 40 °C por persona. El agua fría ingresa a un promedio de 15°C.

### **2.2. Método para el cálculo de la radiación solar incidente**

Los datos de radiación solar diaria se pueden encontrar en los reportes de radiación solar de las estaciones meteorológicas o en cuyo defecto deben ser determinados. Es importante definir los períodos de uso, ya que como consecuencia de las estaciones climáticas, los

valores de la radiación solar cambian para cada época del año. Estos valores influyen de manera importante en el tamaño del sistema, por lo que debe hacerse un análisis del valor que se utilizará en el diseño del sistema. Los criterios para la selección del valor de radiación solar en un período determinado, son:

a) Baja radiación

Se aplica cuando se desea cubrir durante todo el año la demanda de agua caliente con energía solar. En épocas de alta radiación esto hace ineficiente al sistema, por cuanto al incrementarse la radiación se produce un exceso de agua caliente.

b) Alta radiación

Se diseña con este valor cuando se cuenta con un sistema auxiliar para el calentamiento de agua, como electricidad, gas y en algunos casos leña. Son los sistemas más eficientes, pero su aplicación está limitada por el empleo de un sistema auxiliar.

c) Valor promedio de radiación

El diseño con el promedio anual de radiación satisface parcialmente la demanda de agua caliente durante los meses de baja radiación y se tienen pequeños excesos en los meses de alta radiación, pero puede ser complementado con un sistema auxiliar de calentamiento en las épocas frías. En el desarrollo del proyecto de tesis se utilizó este último criterio.

d) Valor promedio de temperatura ambiente

Para la medición de los valores de temperatura, se usó una cámara termográfica. Instrumento dotado de un mecanismo que registra continuamente la temperatura de manera gráfica durante un tiempo determinado. El INAMHI utiliza registros gráficos en fajas de duración semanal. Este instrumento se utiliza ante la incapacidad del ser humano de observar de manera continua la variación de la temperatura en el tiempo. La parte sensible está constituida por una placa bimetálica que tiene dos capas, con metales de diferentes

coeficientes de dilatación lo que permite una deformación del bimetálico debido a los cambios de temperatura y diferente grado de dilatación de los metales.

### **2.2.1. Método para el cálculo de la declinación solar y pendiente de los colectores**

En el estudio de los procesos térmicos solares es muy importante el medio de captación de la energía solar, ya que con base en esto se puede diseñar todo un sistema que opere utilizándola y aprovechando el mayor porcentaje posible. Para recolectar la mayor cantidad de energía radiante procedente del sol, es necesario contar con un sistema de colectores que ofrezcan su cara perpendicular a la incidencia de los rayos solares, a la hora en que el sol se encuentra en su posición más alta sobre el meridiano local (12 horas tiempo solar).

La relación geométrica entre un plano con cualquier orientación particular relativa a la Tierra a cualquier hora y la radiación solar incidente, esto es, la posición del sol con respecto a ese plano, se puede describir en términos de algunos ángulos (Figura 2.1).

Estos ángulos y su definición son los siguientes:

$\emptyset$ = Latitud (norte positiva).

$\delta$ = Declinación (posición angular del sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador) (norte positiva).

S= El ángulo entre la horizontal y el plano (pendiente).

Y= Desviación de la normal a la superficie con respecto al meridiano local, el punto cero corresponde al sur, el este es positivo y el oeste negativo.

W= Ángulo de la hora, el mediodía solar corresponde al cero, y cada hora es igual a  $15^\circ$  de longitud con las mañanas positivas y las tardes negativas.

$\theta$ = El ángulo de incidencia de la radiación. Este ángulo se mide con respecto a la normal.

La pendiente de los colectores para tener incidencia normal al mediodía solar depende de la hora y del día en un año, por lo que se estima un valor promedio en función del lugar donde se dese instalar el mismo.

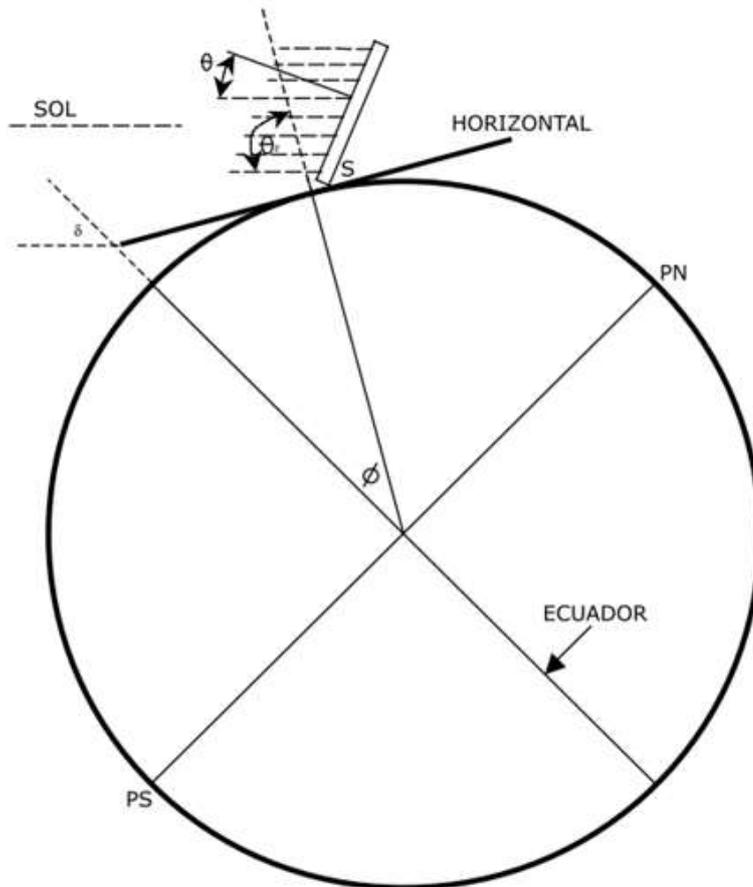


Figura 2.1. Ángulos de la radiación solar incidente (Fuente: Paz, 2005)

## 2.3. Método para el cálculo del número de colectores y el volumen del sistema de almacenamiento.

### 2.3.1. Demanda Energética

La demanda energética se define como la energía necesaria para elevar la temperatura de un volumen determinado de agua, desde una temperatura inicial ( $T_i$ ) hasta una temperatura de consumo ( $T_f$ ).

$$E = M \cdot Cp \cdot (T_f - T_i) \quad 2.1$$

Donde:

E: Demanda energética, kJ/día

M: Masa de agua a calentar en un día, kg/día

C<sub>p</sub>: Capacidad calorífica del agua, 4,18 kJ/kg °C

T<sub>i</sub>: Temperatura inicial del agua, °C

T<sub>f</sub>: Temperatura de consumo del agua, °C

De otra parte, la masa de agua M, está dada por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{n_p \cdot \rho_{H_2O} \cdot V_p}{1000} \quad 2.2$$

Donde:

n<sub>p</sub>: Número de personas, personas/día

V<sub>p</sub>: Volumen de agua per cápita, l/persona

ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: Densidad del agua, 1 000 kg/m<sup>3</sup>

El volumen de agua per cápita V<sub>p</sub> es la cantidad de agua que necesita una persona diariamente, este volumen varía en un rango de 20 a 60 litros.

En la determinación del número de colectores del sistema de calentamiento de agua, es necesario conocer el área de captación y la eficiencia global del colector.

### 2.3.2. Área de captación

Es el área necesaria para captar la energía solar que pueda satisfacer la demanda energética. El área depende de la radiación global y de la eficiencia total del sistema de calentamiento de agua.

$$A_{cap} = \frac{E}{H_p \cdot \eta_g} \quad 2.3$$

Donde:

$A_{cap}$ : Área de captación,  $m^2$

$H_p$ : Radiación solar,  $Wh/m^2$

$\eta_g$ : Eficiencia global del sistema de calentamiento (%)

### 2.3.3. Número de colectores y Volumen del depósito de almacenamiento

La cantidad de colectores necesarios para satisfacer la demanda energética está determinada por la relación:

$$N_c = \frac{A_{cap} \cdot F_s}{A_c} \quad 2.4$$

Donde:

$N_c$ : Número de colectores

$A_{cap}$ : Área captación ( $m^2$ )

$A_c$ : Área de un colector ( $m^2$ )

$F_s$ : Factor de seguridad o de proyección de demanda (1 - 1,5)

### 2.3.4. Procedimiento para el cálculo del depósito de almacenamiento

La temperatura a la que almacena el agua, se denomina temperatura equivalente ( $T_{eq}$ ), la cual varía en función de la temperatura del agua fría. Sin embargo el incremento de temperatura, es decir la temperatura equivalente menos la temperatura del agua fría, es un valor aproximadamente constante para cada sistema, 30 °C en el sistema puntual y 20 °C en el sistema continuo.

Con el valor de la temperatura equivalente se recalcula la demanda energética, y se obtiene otro valor de la masa de agua, que se denomina masa de agua a almacenar. En los cálculos se reemplaza el valor de la temperatura de consumo por el de la temperatura equivalente, y el valor de la masa a calentar por el de masa a almacenar. El volumen del depósito está determinado por la masa de agua a almacenar y por el tipo de uso, ya sea un sistema

puntual o un sistema continuo. En el sistema puntual, el volumen se calcula 15 % más que la masa de agua a almacenar en un día:

$$V_{dep} = 1,15 \cdot M \quad 2.5$$

Donde:

$V_{dep}$ : Volumen del depósito de almacenamiento (litros)

M: Masa de agua a almacenar (kg/día)

En el sistema continuo, el volumen se calcula 20 % de la masa de agua a almacenar; sin embargo, por detalles constructivos la capacidad del depósito no debe ser menor a 80 litros. La selección del tipo y espesor del aislamiento del depósito de almacenamiento se presenta en la tabla 2.1.

*Tabla 2.1. Tipo de aislamiento y espesor recomendado*

Tipo de aislamiento	Espesor Recomendado (mm)		Conductividad térmica (W/m °C)
	Sistema puntual	Sistema continuo	
Algodón	50	75	0,059
Asbesto	75	125	0,174
Lana de vidrio	25	50	0,038
Paja	50	100	0,090

### Altura del depósito de almacenamiento

$$L_d = \frac{4 \cdot V \cdot \pi}{D^2} \quad 2.6$$

#### 2.4. Procedimiento para el cálculo de la transferencia de calor por convección

La velocidad de transferencia de calor entre dos placas inclinadas a cierto ángulo con respecto a la horizontal es de importancia obvia en el cálculo de la eficiencia de colectores planos. Una revisión de todos los trabajos realizados hasta la fecha indican que el coeficiente de transferencia de calor  $h$  en función de la separación de las dos placas,  $l$ , de la diferencia de temperaturas entre ellas,  $\Delta T$ , y de la temperatura media ( $T_1$  y  $T_2$ ) está dado por (Paz, 2005):

$$h_{p-c} = 1,61 \frac{\Delta T^{0,31}}{l^{0,07}} e^{-0,00143305 \cdot \Delta T} \quad 2.7$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección, ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$l$ : Separación entre las placas, cm

$T_1, T_2$ : Temperaturas de las placas,  $^\circ\text{C}$

$\Delta T$ : Temperatura media entre las placas,  $^\circ\text{C}$

La pérdida de calor por convección entre la superficie plana del colector y el aire ambiente se determina por la siguiente expresión (Paz, 2005):

$$h_v = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad 2.8$$

Donde:

$V$ : Velocidad del aire, m/s

#### 2.5. Cálculo de la absorción, reflexión y transmisión de la radiación en el colector solar plano

Para superficies opacas, la suma de la absorbitancia y de la reflectancia debe ser igual a uno. Si la superficie es transparente a la radiación incidente, la suma de la absorbitancia, reflectancia y transmitancia debe ser igual a uno. Fresnel derivó una relación para la

reflexión de radiación no polarizada al pasar de un medio con índice refractivo  $n_1$  a otro con índice  $n_2$ .

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad 2.9$$

Donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y refracción. En esta expresión los dos términos dentro del paréntesis cuadrado representa la reflexión para cada uno de los dos componentes de polarización. Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  están relacionados con los índices de refracción por la Ley de Snell (Paz G., 2005).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\theta_2}{\text{sen}\theta_1} \quad 2.10$$

Los materiales usados para cubrir colectores solares (vidrio) requieren la transmisión de la radiación a través de ellos, existen por lo tanto dos interfases por cubierta que causan pérdidas de reflexión. Despreciando absorción de la radiación en la cubierta como se muestra en la Figura 3.2,  $(1-\rho)$  de la radiación incidente llega a la segunda interfase. De esta,  $(1-\rho)^2$  pasa a través de la interfase y  $\rho(1-\rho)$  se refleja a la primera y así sucesivamente.

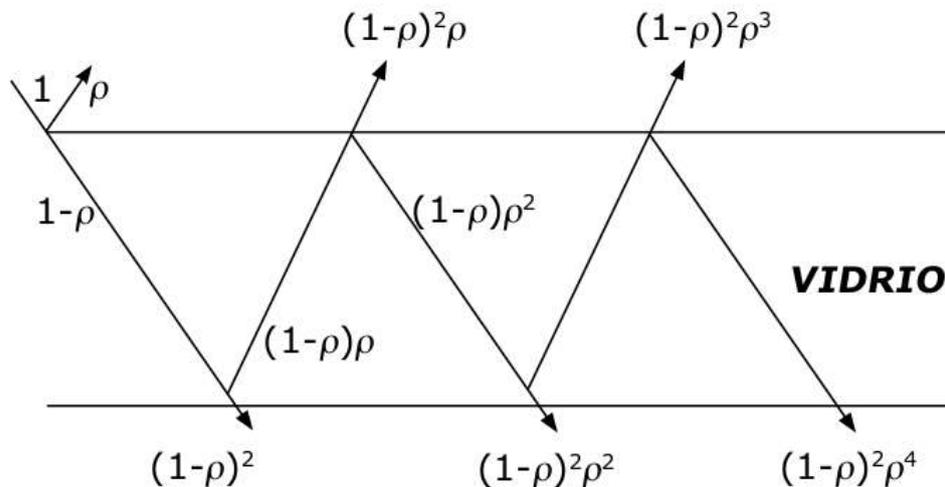


Figura 2.2. Transmisión de la radiación a través de la cubierta de vidrio (Fuente: Paz G., 2005).

Sumando todos los términos, se tiene que la transmitancia para una sola cubierta despreciando la absorción es:

$$\tau_r = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad 2.11$$

Para un sistema de "n" cubiertas, todas del mismo material se obtiene:

$$\tau_{r,n} = \frac{1-\rho}{1+(2n-1)\rho} \quad 2.12$$

Para obtener la transmitancia permitiendo tanto reflexión como absorción, es necesario multiplicar ambos valores.

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad 2.13$$

Donde  $\tau_a$  es la transmitancia por absorción y se determina por la siguiente ecuación:

$$\tau_a = e^{-K \cdot L} \quad 2.14$$

Para el vidrio, el valor de "K" varía desde 0,04 cm para uno muy transparente hasta 0,32 cm para uno de mala calidad. Para "N" cubiertas de grosor L, la expresión anterior queda como:

$$\tau_a(\theta_1) = e^{-NKL/\cos\theta_2} \quad 2.15$$

De la radiación que pasa a través de la cubierta y que llega al absorbente, alguna se refleja hacia la cubierta, sin embargo no toda esta radiación se pierde, ya que una parte se refleja de nuevo hacia el absorbente.

En la Figura 2.3 se ilustra la anterior situación, " $\tau$ " representa la transmitancia de la cubierta a un cierto ángulo deseado según se calcula de (2.13) y " $\alpha$ " es la absorbitancia angular de la placa absorbente. De la energía incidente, " $\tau \cdot \alpha$ " se absorbe por la placa absorbente y  $(1-\alpha)\tau$  se refleja nuevamente al sistema de cubierta. La reflexión de la placa absorbente es difusa, por lo tanto la fracción  $(1-\alpha)\tau$  que llega a la cubierta es radiación

difusa y  $(1-\alpha)\tau\rho_d$  se refleja de nuevo a la placa absorbente. La cantidad  $\rho_d$  se refiere a la reflexión por la cubierta de la radiación incidente difusa.

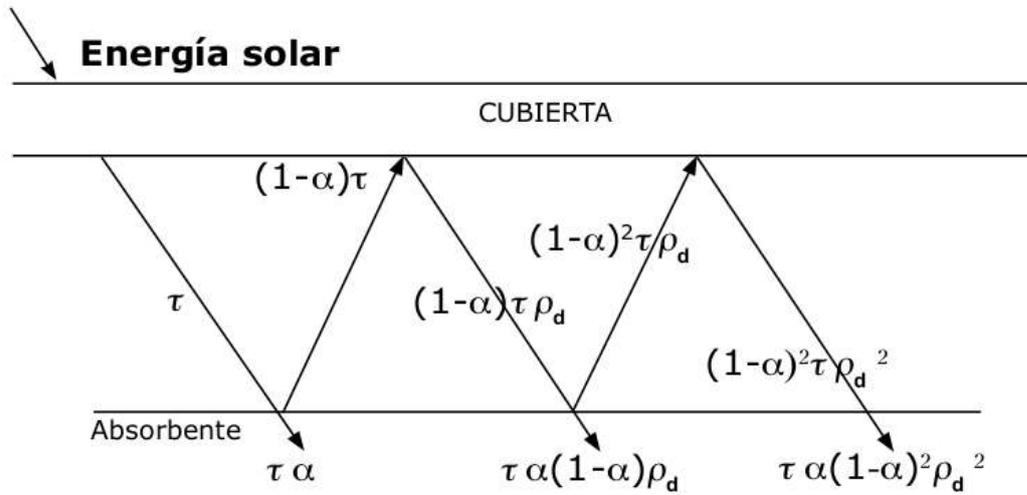


Figura 2.3. Transmisión de la radiación difusa a través de la cubierta de vidrio (Fuente: Paz G., 2005).

La reflexión múltiple de la radiación difusa continúa y la energía total absorbida por la placa absorbente es:

$$(\tau \cdot \alpha) = \tau \cdot \alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad 2.16$$

La reflectancia difusa  $\rho_d$ , se puede estimar usando la reflexión del sistema de cubierta a un ángulo de incidencia de  $60^\circ$ .

$$\rho_d = 1 - \tau_r(60^\circ) \quad 2.17$$

## 2.6. Método para el cálculo de la eficiencia real del sistema de calentamiento

La eficiencia de un colector solar está descrita por un balance de energía que indica la distribución de energía solar incidente en una ganancia energética útil y varias pérdidas. El balance de energía en todo el colector se puede escribir de la siguiente forma:

$$A_c \{ [H \cdot R(\tau \cdot \alpha)]_{directa} + [H \cdot R(\tau \cdot \alpha)]_{difusa} \} = Q_u + Q_L + Q_S \quad 2.18$$

Donde:

H: Energía solar incidente en un área unitaria sobre la superficie de la Tierra.

R: Factor para convertir la radiación directa o difusa a la que incide en el plano del colector.

$(\tau \cdot \alpha)$ : Producto de la transmitancia por la abosbitancia o de la cubierta para la radiación directa o difusa.

$A_c$ : Área del colector.

$Q_u$ : Razón de energía transferida al fluido dentro del colector.

$Q_L$ : Razón de pérdidas de energía del colector a los alrededores por radiación, convección y conducción.

$Q_S$ : Razón de energía almacenada en el colector.

Una medida de la eficiencia del colector es la eficiencia de colección, definida como la razón de la ganancia útil durante cualquier periodo de tiempo igual a la energía solar incidente en el mismo periodo de tiempo.

$$\eta = \frac{\int \frac{Q_u}{A_c} d\tau}{\int (H \cdot R) d\tau} \quad 2.19$$

La eficiencia del colector para cada hora de operación se puede encontrar por la siguiente ecuación:

$$\eta_{hora} = \frac{Q_u}{H \cdot R \cdot A_c} \quad 2.20$$

La eficiencia diaria no es el promedio de la eficiencia horaria, sino se debe calcular de la forma siguiente:

$$\eta_{dia} = \frac{\sum Q_u}{A_c \sum H \cdot R} \quad 2.21$$

## 2.6. Cálculo del coeficiente global de pérdida de calor $U_L$

Para el cálculo del coeficiente de pérdida de calor es necesario considerar la red térmica para un sistema de una cubierta que se muestra en la Figura 2.4.

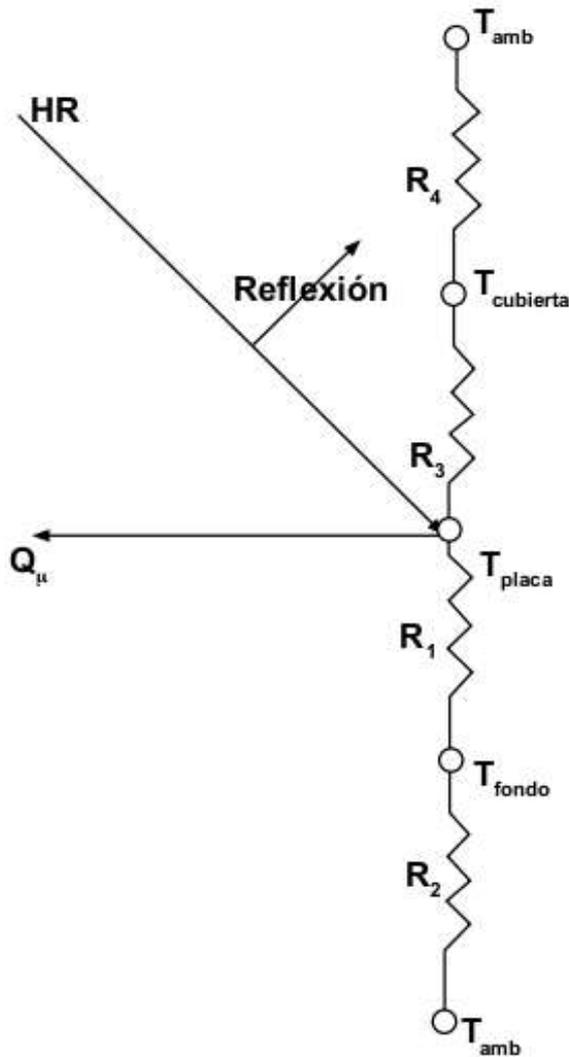


Figura 2.4. Red térmica para un sistema de una cubierta plana

En un cierto lugar de la placa donde la temperatura es  $T_{placa}$ , una cantidad  $S$  de energía solar se absorbe

$$[H \cdot R(\tau \cdot \alpha)]_{directa} + [H \cdot R(\tau \cdot \alpha)]_{difusa} = S$$

Esta energía se distribuye en pérdidas por la parte superior ( $U_t$ ), inferior ( $U_b$ ), y los lados ( $U_e$ ), del colector ( $U_L = U_t + U_b + U_e$ ) y en una ganancia energética útil. El propósito es convertir la red de la figura 3.2 en una red global de la forma siguiente (figura 2.5):

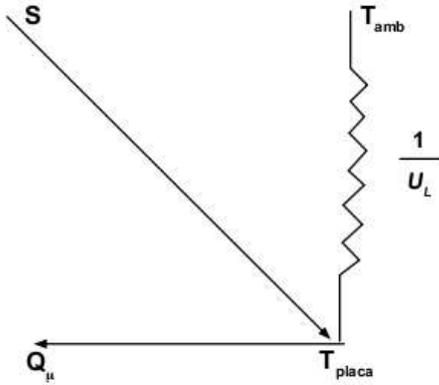


Figura 2.5. Red térmica global para un sistema de una cubierta plana

La pérdida de energía por la parte inferior del colector está representada por dos resistencias  $R_1$  y  $R_2$  en serie.  $R_1$  representa la resistencia al flujo de calor a través del aislante y  $R_2$  representa la resistencia de radiación y convección hacia el ambiente. De hecho se puede suponer que  $R_2 \approx 0$  y que toda la resistencia se debe al aislante. Por lo tanto el coeficiente de pérdidas en la parte inferior ( $U_b$ ), es aproximadamente igual a:

$$U_b = \frac{1}{R_1} = \frac{K}{L} \quad 2.22$$

Donde:

K: Conductividad térmica, W/m °C

L: Espesor del aislante, m

Las pérdidas por los lados ( $U_e$ ) siempre son muy pequeñas, por lo tanto no es necesario predecirlas con mucha certeza.

$$U_e = \frac{K \cdot A_{lados}}{L \cdot A_{base}} \quad 2.23$$

El coeficiente global de pérdidas se obtiene mediante la suma de pérdidas por la parte superior ( $U_t$ ), inferior ( $U_b$ ), y los lados ( $U_e$ ), del colector.

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad 2.24$$

El coeficiente de pérdidas de la superficie superior es el resultado de la convección y radiación entre placas paralelas. La transferencia de energía entre la placa absorbadora a una temperatura  $T_p$  y la cubierta de vidrio a  $T_c$  es la misma que entre la cubierta y el ambiente.

$$q_{p\acute{e}rdida, arriba} = h_{p-c}(T_p - T_c) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_c^4)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \quad 2.25$$

Donde  $h_{p-c}$  es el coeficiente de transferencia de calor entre dos placas paralelas inclinadas. Si el término de radiación se linealiza, el coeficiente de transferencia de calor por radiación se puede usar y la pérdida de calor es:

$$q_{p\acute{e}rdida, arriba} = (h_{p-c} + h_{rp-c})(T_p - T_c) \quad 2.26$$

$$h_{rp-c} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \quad 2.27$$

La resistencia,  $R_3$ , se puede expresar de la siguiente forma:

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-c} + h_{rp-c}}$$

La resistencia de radiación de la cubierta tiene que ver con la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

$$h_{rc-s} = \epsilon_c \cdot \sigma(T_c + T_a)(T_c^2 + T_a^2) \quad 2.28$$

La resistencia hacia la atmósfera ( $R_4$ ) está dada por la suma de las resistencias por convección y la radiación:

$$R_4 = \frac{1}{h_v + h_{rc-s}}$$

Para este sistema el coeficiente global de transferencia de calor por la parte superior de la placa del colector al ambiente es:

$$U_t = \frac{1}{R_3 + R_4}$$

Sustituyendo los valores de  $R_3$  y  $R_4$  se obtiene:

$$U_t = \frac{1}{h_{p-c} + h_{rp-c}} + \frac{1}{h_v + h_{rc-s}} \quad 2.29$$

La temperatura de la cubierta de vidrio ( $T_c$ ) se determina considerando que la pérdida de calor de la placa a la cubierta es la misma que de la placa al ambiente. Por lo tanto se obtiene:

$$T_c = T_p - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{p-c} + h_{rp-c}} \quad 2.30$$

El procedimiento es suponer una temperatura mediante la cual  $h_{p-c}$ ,  $h_v$ ,  $h_{rp-c}$  y  $h_{rp-s}$  se calculan. Con estos coeficientes de transferencia de calor, se calcula el coeficiente de pérdida de calor por la parte superior del colector. Estos resultados se usan para calcular la temperatura de la cubierta ( $T_c$ ) mediante la ecuación 2.24. Si  $T_c$  se aproxima a la que se propone, no hay que hacer más cálculos. De otra manera, la nueva  $T_c$  se usa y se requiere otro cálculo mediante un procedimiento iterativo.

## 2.7. Factor de eficiencia del colector plano y factor de calor removido

Para determinar el factor de eficiencia del colector plano es necesario derivar la distribución de temperatura entre dos tubos, suponiendo que el gradiente de temperatura en la dirección del fluido es despreciable. Considerando la configuración placa-tubo que se muestra en la Figura 2.6.

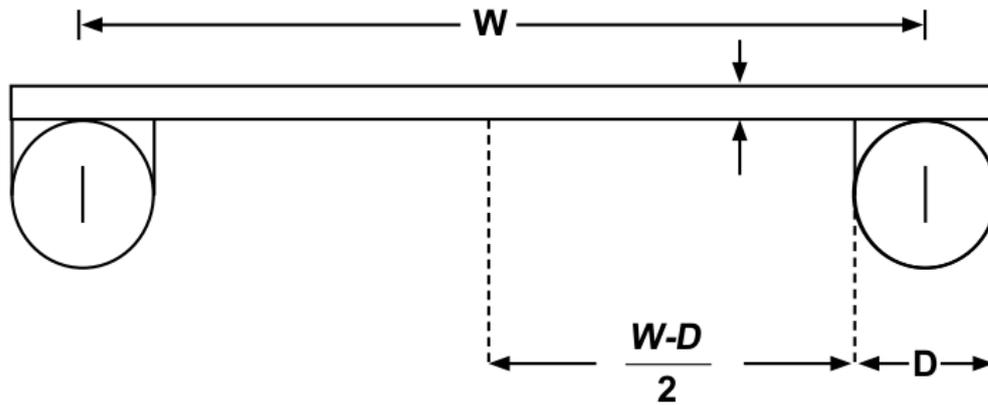


Figura 2.6. Configuración placa-tubo de un colector solar plano (Fuente: Bértiz L. y M. Álvarez, 2008)

La eficiencia estándar de la placa ( $F$ ) del colector solar plano con perfil rectangular se calcula por la siguiente ecuación

$$F = \frac{\text{Tanh}\frac{m}{2}(W-D)}{\frac{m}{2}(W-D)} \quad 2.31$$

El factor de eficiencia del colector ( $F'$ ) se calcula por la siguiente expresión:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad 2.32$$

El factor de calor removido se obtiene por:

$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L} \left( 1 - e^{-\left( U_L \cdot F' / G \cdot C_p \right)} \right) \quad 2.33$$

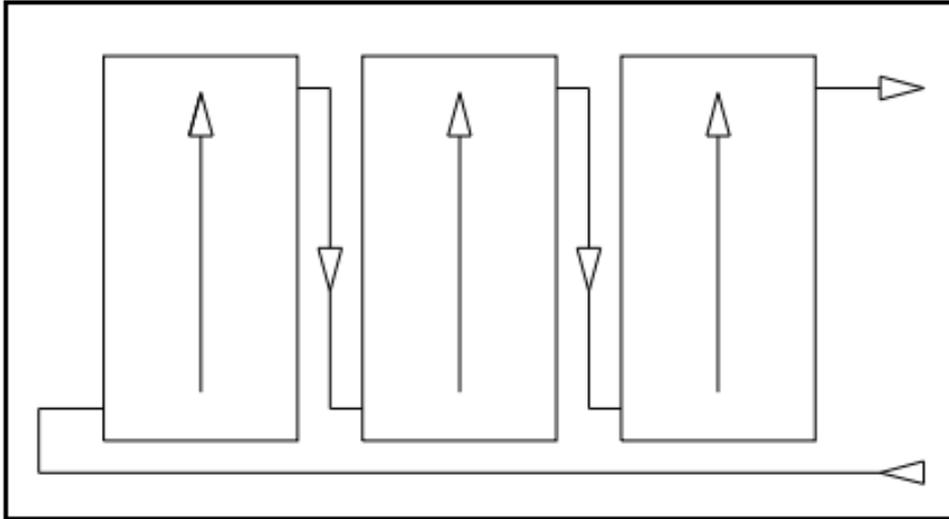
La energía total útil ganada por el colector se calcula por:

$$Q_u = A_C F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad 2.34$$

## 2.8. Procedimiento para la conexión de los colectores solares planos

El acoplamiento en serie de los colectores (figura 2.7) tiene como consecuencia un aumento de la temperatura del agua, a costa de disminuir el rendimiento de la instalación, debido a que al pasar el fluido de un colector a otro, la temperatura de entrada en cada uno

va aumentando y por lo tanto disminuyendo la eficacia global del sistema. Esto es por lo que no son muchas las veces que se tiende a esta solución, sólo en algunas aplicaciones en las que es necesario una temperatura superior a 60°C.



*Figura 2.7. Conexión en serie de los colectores solares planos (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)*

Lo más habitual es disponer los colectores acoplados en paralelo, o en caso de disponerse en varias filas colocarse éstas también en paralelo. De cualquier forma deberán tener el mismo número de unidades y estar colocadas paralelas, horizontales y bien alineadas entre sí (figura 2.8).

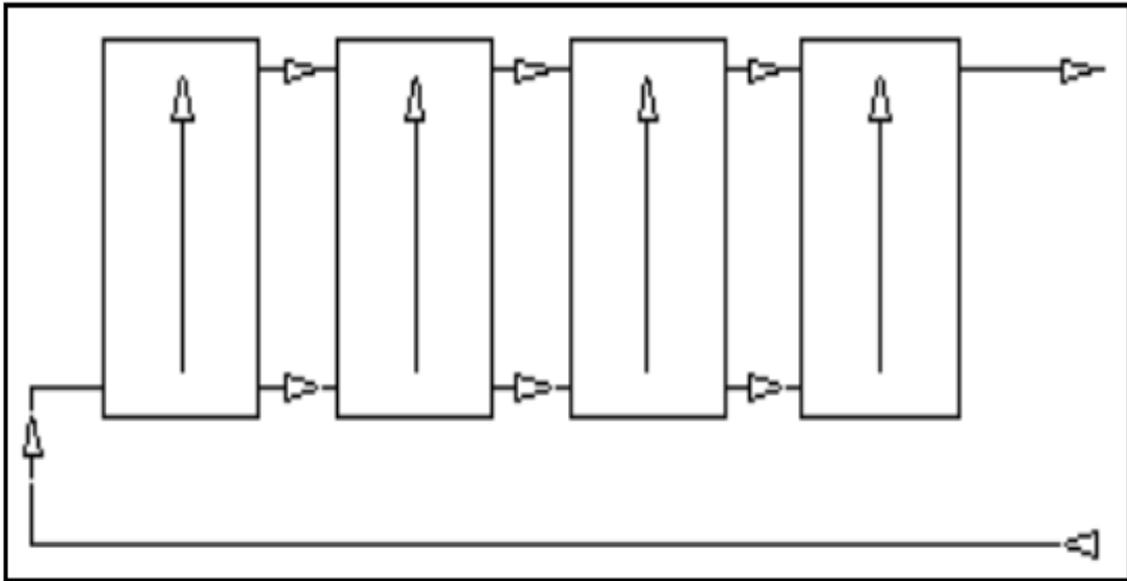


Figura 2.8. Conexión en paralelo de los colectores solares planos (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)

El número de captadores que se pueden conectar en paralelo tendrá en cuenta las limitaciones del fabricante, debiéndose instalar válvulas de cierre en la entrada y salida de las distintas baterías de captadores y entre las bombas, de manera que puedan utilizarse para aislamiento de estos componentes en labores de mantenimiento, sustitución, entre otros.

La colocación de los colectores debe asegurar que el recorrido hidráulico sea el mismo para todos los colectores, de no ser así, los saltos térmicos de los colectores serían diferentes de unos a otros, reduciéndose el rendimiento global de la instalación. A fin de garantizar el equilibrio hidráulico, es necesario disponer las conexiones de los colectores entre sí de forma que se realice el llamado “retorno invertido”.

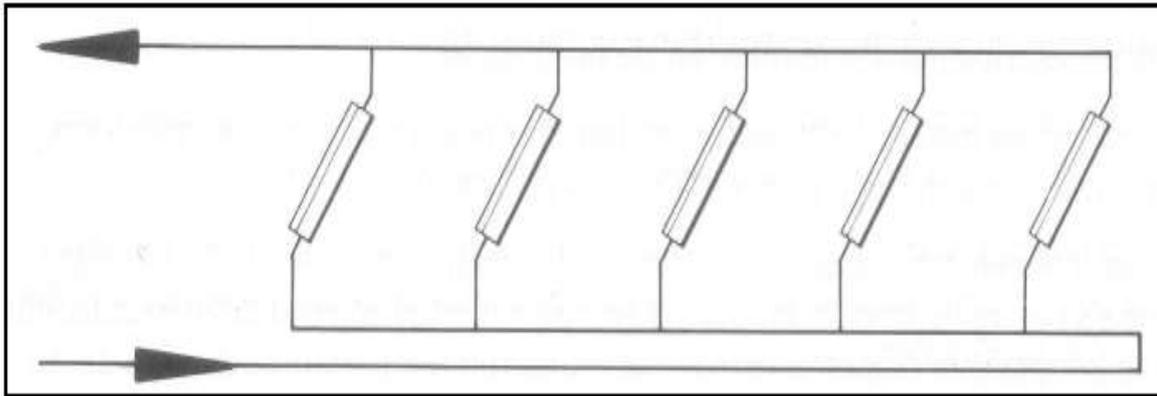


Figura 2.9. Esquema de conexión conocido como “retorno invertido” (Fuente: Bériz L. y M. Álvarez, 2008)

El caudal de los colectores no debe bajar de los 0.8 litros por metro cuadrado y por minuto, así se asegura un coeficiente de transmisión de calor adecuado entre el absorbedor y el fluido. Un valor óptimo situaría al caudal alrededor de 1 litro por metro cuadrado y minuto. La longitud del circuito debe ser la más reducida posible para paliar las posibles pérdidas hidráulicas y de calor en el mismo, además de intentar disminuir las pérdidas de calor e hidráulicas en todos los accesorios añadidos al circuito. Y no hay que olvidar que el diseño debe permitir montar y desmontar los colectores.

## 2.9. Características del subsistema de almacenamiento y de apoyo

La necesidad de disponer de un subsistema de almacenamiento que haga frente a la demanda en momentos de insuficiente radiación solar. La forma más sencilla y habitual de almacenar energía es mediante acumuladores de agua caliente, los cuales suelen ser de acero, acero inoxidable, aluminio o fibra de vidrio reforzado.

La forma del acumulador suele ser cilíndrica, siendo la altura mayor que el diámetro, haciendo de esta manera que se favorezca el fenómeno de la estratificación. Esto es, al disminuir la densidad del agua con el aumento de la temperatura, cuanto mayor sea la

altura del acumulador mayor será la diferencia de temperatura entre la parte inferior y la parte superior del mismo, es decir, mayor será la estratificación. Por la parte superior se extrae agua para su consumo, mientras que el calentamiento solar se aplica en la parte inferior, así se hace funcionar a los colectores a la mínima temperatura posible, aumentando por tanto su rendimiento.

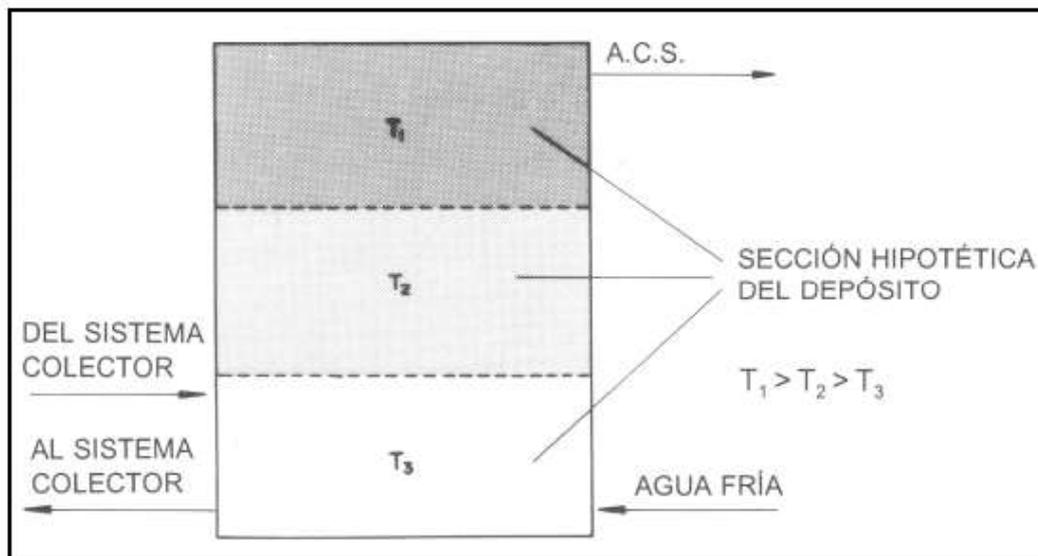


Figura 2.10. Estratificación de agua en el acumulador (Fuente: Paz, 2005)

### Subsistema de energía de apoyo

No en todas las ocasiones el agua del acumulador va a tener la temperatura necesaria para el consumo, por lo que es necesario dotar a la instalación de un sistema de apoyo que aporte la energía necesaria para cumplir nuestros objetivos.

Las diferentes posibilidades son: aplicar directamente en el acumulador la energía de apoyo, situar la energía de apoyo en un segundo acumulador alimentado por el primero o situar un sistema de apoyo instantáneo después del acumulador.

Esta configuración, ante el proyecto para viviendas unifamiliares se adopta de forma descentralizada, que responde a la configuración de un sistema de apoyo por cada usuario.

El sistema de apoyo ha de ser capaz de dar respuesta por sí solo a las necesidades térmicas para abastecimiento de agua caliente sanitaria, ya que es evidente que existen días en los que la radiación solar es baja o nula.

### **2.10. Procedimiento para el procesamiento estadístico de los resultados en el colector solar plano.**

El procesamiento estadístico se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

*Media aritmética:*

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad 2.35$$

Donde:

$x_i$  - elementos de la serie.

$n$  - número de pruebas.

*Desviación media:*

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad 2.36$$

*La varianza muestral:*

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad 2.37$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral se denomina error estándar  $S_x$ . El error estándar de la media aritmética es:

$$\delta = \frac{t_d \cdot S_x}{\sqrt{n}} \quad 2.38$$

El procesamiento estadístico se ejecuta con el empleo del criterio de Student para una probabilidad  $t_{0,95}$  mediante la comparación del  $t$  observado con  $t_d$  de la tabla:

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S_x} \quad 2.39$$

### **Cálculo de los errores relativo puntual y promedio**

La confirmación de la validez de los valores experimentales con los teóricos se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental “ $X_{\text{exp}}$ ” y los valores teóricos de los parámetros fundamentales en el proceso de calentamiento de agua en viviendas unifamiliares.

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad 2.40$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad 2.41$$

En los cálculos de ingeniería una desviación del 10 % es satisfactoria, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser industriales con menor precisión.
- Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- Los valores experimentales son promedios de las réplicas.
- Posibles errores de apreciación cometidos en las mediciones, por pequeñas oscilaciones que ocurren en los líquidos manométricos durante los experimentos.

## 2.11 Instrumentos usados en el cálculo experimental de la eficiencia del colector

### *Instrumento para medir la radiación solar*

- La radiación global se define como la radiación solar recibida de un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes sobre una superficie horizontal. La radiación global incluye la recibida directamente del disco solar y también la radiación celeste difusa dispersada al atravesar la atmósfera. El instrumento necesario para medir la radiación global es el piranómetro.



*Figura 4.1. Piranómetro SP-216 para medir la radiación solar (fuente: el autor)*

Este se utiliza a veces para medir la radiación incidente sobre superficies inclinadas y se dispone en posición invertida para medir la radiación global reflejada (albedo). Para medir solamente la componente difusa de la radiación solar, la componente directa se cubre por medio de un sistema de pantalla o sombreado. Las mediciones

de la radiación solar global se realizaron usando el piranómetro SP- 216, en la figura 4.1 se muestra una imagen del equipo utilizado

*Instrumento usado para medir la temperatura*

- Las mediciones de la temperatura ambiente y la temperatura del agua a la entrada y salida del colector se realizaron usando termómetros bimetálicos con un rango de temperatura que varía entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$ , como se observa en la figura.



*Figura 4.2. Termómetro bimetálico para medir temperatura (fuente: el autor)*

Además de los instrumentos para medir la radiación global y las temperaturas se usó un recipiente graduado para medir el volumen de agua que circula por el colector y un cronómetro para medir el tiempo en que se alcanza el volumen deseado, ello permitió determinar el flujo másico a partir del conocimiento de la densidad del agua.

### *Instalación experimental*

- La instalación experimental se encuentra ubicada en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Guayaquil, la misma está compuesta por el colector solar plano, el tanque de almacenamiento de agua, la estructura para el soporte y los accesorios necesarios tales como: tuberías, válvulas, codos, entre otros. En la figura 4.3 se expone una vista de la instalación.



*Figura 4.3. Instalación experimental (fuente: el autor)*

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

### **3.1. Resultados de la ubicación geográfica**

Guayaquil está ubicado al noroeste de América del Sur en la costa del Océano Pacífico. Específicamente se encuentra en la parte central de la región litoral, mejor conocida como costa, en la República del Ecuador. De acuerdo a la división territorial del Ecuador, la ciudad de Guayaquil, junto a varios territorios aledaños, conforman el cantón Guayaquil, de la cual la ciudad es su cabecera cantonal. Adicionalmente, tanto la ciudad como el cantón, forman parte de la provincia del Guayas, de la cual Guayaquil es su capital.

El cantón Guayaquil está ubicado en la parte central de la provincia del Guayas, y limita al norte con los cantones de Lomas de Sargentillo, Nobol, Daule, y Samborondon; al sur con el Golfo de Guayaquil y la provincia de el Oro; al este con los cantones Durán, Naranjal y Balao; y al oeste con la provincia de Santa Elena y el cantón General Villamil; La isla Puná está ubicada en el centro del Golfo de Guayaquil, al sur de varias pequeñas islas e islotes. Tenguel está ubicada entre las provincias de Guayas y El Oro.

La ciudad de Guayaquil se encuentra al noreste del cantón homónimo, y sus límites naturales son: al norte el río Daule; al este el río Daule y el río Guayas; al sur por las islas formadas a partir del Estero Salado; al oeste por la cordillera Chongón-Colonche, aunque nuevos planes habitacionales están siendo construidos del otro lado de la pequeña cordillera. La mayor parte de la ciudad se sitúa entre el río Guayas y el Estero Salado.

La ciudad de Guayaquil está compuesta de 347 km<sup>2</sup> de superficie, de los cuales 316 km<sup>2</sup>, equivalentes al 91,9 % del total, pertenecen a la tierra firme (suelo); mientras que los restantes 29 km<sup>2</sup>, equivalentes al 8,1 %, pertenecen a los cuerpos de agua que comprenden ríos y esteros. La temperatura promedio es de 25,7 °C y un volumen de precipitaciones de 1285,6 mm anuales. En la tabla 3.1 se muestran los datos geográficos más importantes de la ciudad.

*Tabla 3.1. Datos geográficos de la Ciudad de Guayaquil*

Altitud	6 metros sobre el nivel del mar
Coordenadas	2° 11' 0" S, 79° 53' 0" W
Superficie	347 km <sup>2</sup>
Clima	Zona climática tropical
Temperatura promedio	25,7 °C

**Fuente:** Google Earth

En la figura 3.1 se muestra una vista de la ubicación geográfica de la ciudad de Guayaquil



*Figura 3.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Guayaquil.*

**Fuente:** Google Earth

### 3.2. Resultados del estudio solar de la zona

La ubicación geográfica del Ecuador, lo convierte en un país privilegiado en lo que a recurso solar se refiere. Esto se debe a que el ángulo de incidencia de la luz solar, es perpendicular a nuestra superficie durante todo el año, situación que no ocurre en otros sitios del planeta, en donde el ángulo de incidencia de la luz solar, varía acorde a las estaciones del año. Esta ventaja posicional del Ecuador, se traduce en la recepción de una mayor y constante cantidad de radiación solar, misma que varía dentro del territorio nacional únicamente por condiciones climatológicas locales y que varían además de acuerdo a la cercanía o lejanía del Sol.

Para el estudio solar de la zona se ha tomado como referencia el Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica (Figura 3.2) del Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), el mismo consta de atlas mensuales del año. Como se observa en la figura el valor promedio de la radiación solar global para la zona de Guayaquil se encuentra entre 4 y 4,5 kWh/m<sup>2</sup>. Para el desarrollo de los cálculos se escogió un valor promedio de 4,25 kWh/m<sup>2</sup>.

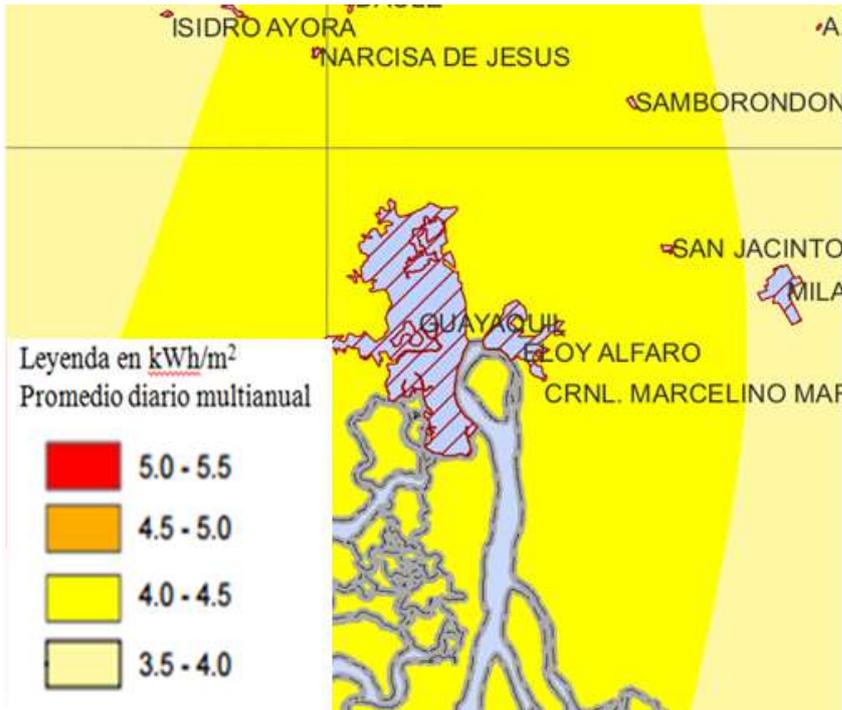


Figura 3.2. Radiación solar en la zona de Guayaquil. **Fuente:** Anuario Meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015).

Como otra fuente se han tomado datos del Anuario Meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015), para ello se utilizaron los datos registrados por la estación meteorológica La Capilla, en la ciudad de Guayaquil. Esta estación tiene los datos de temperatura y Eliofanía mensuales requeridos para el análisis. En la figura 4.3 se exponen los datos promedios de temperatura correspondiente al año 2015, se observa que el valor promedio de la temperatura se encuentra en los 25,5 °C.

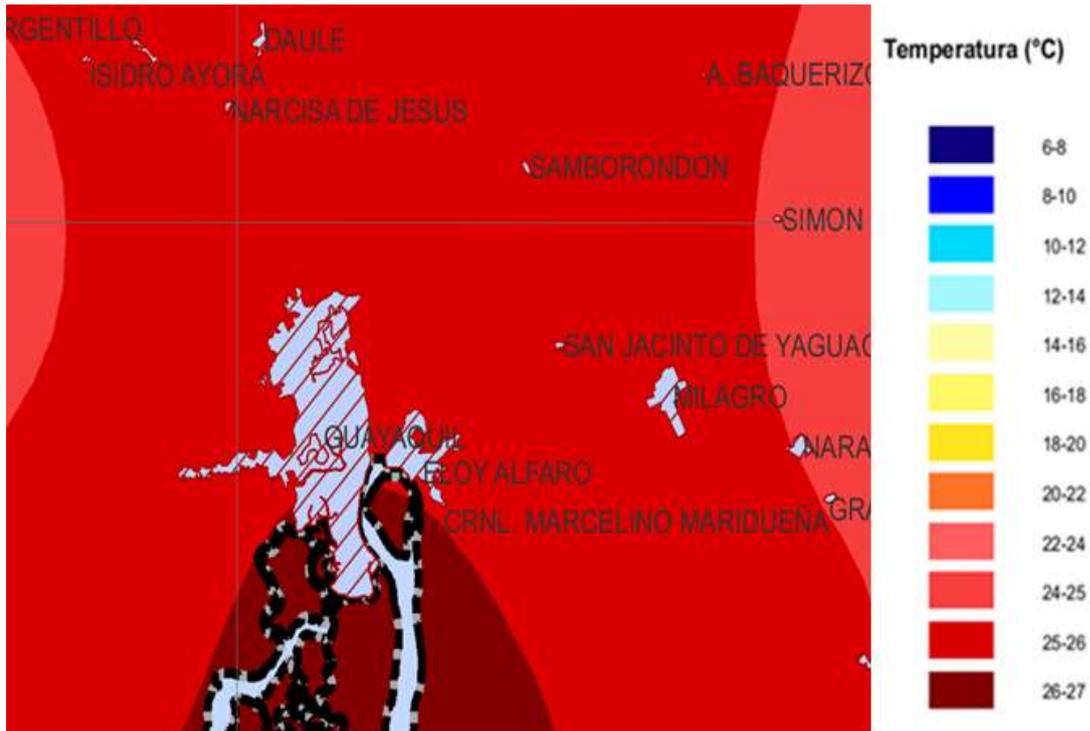


Figura 3.3. Valores promedios de temperatura en la zona de Guayaquil, año 2015.

**Fuente:** Anuario Meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015)

La heliofanía representa la cantidad del brillo del sol y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliofanógrafo, que registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa. La ocurrencia de nubosidad determina que la radiación recibida por el instrumento sea radiación solar difusa, interrumpiéndose el registro. Si bien hay energía incidente disponible, la concentración o densidad de la misma no es suficiente para ser registrada.

En la tabla 3.2 se muestran los datos recopilados de Elíofanía mensuales de la estación meteorológica La Capilla en los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

Tabla 3.2. Datos recopilados de Eliofanía mensuales en la zona de Guayaquil

Estadística Mensual y anual					
Estación Meteorológica La Capilla, Guayaquil					
Eliofanía (horas/meses; W/m <sup>2</sup> )					
	Años				
Meses	2011	2012	2013	2014	2015
Enero	232	179	129,5	109,2	132,2
Febrero	110,7	125,9	130,5	167,1	103,8
Marzo	118,6	106,5	109,3	80,8	106,7
Abril	128,7	112,3	134,7	97,2	141
Mayo	124	134,9	161,5	148,2	115,1
Junio	116,2	129,3	101,2	80,2	128,5
Julio	117,1	194,8	114,1	171,1	111,6
Agosto	138,6	140,2	121,6	122,3	112,9
Septiembre	126,2	150,5	142	73,6	128,9
Octubre	144,9	143,8	159,7	147,5	150,5
Noviembre	146,4	168,4	101,4	129,7	152,1
Diciembre	190,5	134,9	113,2	107,8	145,7
Valor anual	1693,9	1720,5	1518,7	1434,7	1529

**Fuente:** Anuario Meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015)

La tabla 3.3 muestra el número de horas promedio diaria de brillo solar para cada mes.

*Tabla 3.3. Estadística Mensual y anual estación meteorológica La Capilla, Guayaquil*

Estadística Mensual y anual						
Estación Meteorológica La Capilla, Guayaquil						
Eliofanía (horas/meses)						
	Años					
Meses	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio
Enero	7,5	5,8	4,2	3,5	4,3	5
Febrero	4	4,5	4,7	6	3,7	4,6
Marzo	3,8	3,4	3,5	2,6	3,4	3,4
Abril	4,3	3,7	4,5	3,2	4,7	4,1
Mayo	4	4,4	5,2	4,8	3,7	4,4
Junio	3,9	4,3	3,4	2,7	4,3	3,7
Julio	3,8	6,3	3,7	5,5	3,6	4,6
Agosto	4,5	4,5	3,9	3,9	3,6	4,1
Septiembre	4,2	5	4,7	2,5	4,3	4,1
Octubre	4,7	4,6	5,2	4,8	4,9	4,8
Noviembre	4,9	5,6	3,4	4,3	5,1	4,7
Diciembre	6,1	4,4	3,7	3,5	4,7	4,5

### 3.3. Resultados de la demanda energética

Para el cálculo de la demanda energética se dispone de los siguientes datos iniciales

Tabla 3.4. Datos iniciales para el cálculo de la demanda energética

Parámetros	Valores de los parámetros
Capacidad calorífica del agua	$C_p = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$
Densidad del agua	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}: 1\ 000 \text{ kg/m}^3$
Temperatura inicial del agua	$T_i = 15^\circ\text{C}$
Temperatura de consumo del agua	$T_f = 40^\circ\text{C}$
Número de personas, personas/día	$n_p=5$
Radiación solar incidente	$H_p= 4,25 \text{ kW/m}^2$
Volumen de agua per cápita, l/persona	$V_p = 40 \text{ l por personas}$
Eficiencia global del sistema de calentamiento	$\eta_g=45 \%$

Tabla 3.5. Resultados del cálculo del número de colectores y el depósito de almacenamiento en el sistema

Parámetros	Resultados	Número de la ecuación
Demanda Energética	$E = 29160 \text{ kJ}$	2.1
Masa de agua	$M = 200 \text{ kg}$	2.2
Área de captación	$A_{\text{cap}} = 3,44 \text{ m}^2$	2.3
Número de colectores	$N_c = 2 \text{ colectores}$	2.4
Volumen del depósito de almacenamiento	$V_{\text{dep}} = 300 \text{ l } (0,3 \text{ m}^3)$	2.5
Diámetro del depósito de almacenamiento	$D_d = 1 \text{ m}$	--
Altura del depósito de almacenamiento	$L_d = 1,3 \text{ m}$	2.6

### 3.4. Selección del colector para el calentamiento de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares

Para la selección del colector se realizó un estudio de los principales suministradores de este tipo de tecnología en el Ecuador. Con los resultados de la tabla 3.5 y el análisis anterior se proponen la compra de dos colectores de placas plana de cubierta de vidrio de la firma ENERGOS, como se muestra en la figura 3.4.



*Figura 3.4. Colector seleccionado para el calentamiento de agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares (fuente: energos.com)*

Las características fundamentales son las siguientes:

- Modelo: NH – TF-20
- Capacidad: 200 litros
- Abastecimiento: 4 personas
- Usos: Duchas, Lavamanos, lavavajillas y lavadora
- Vida útil: 25 años
- Sistema de backup: Booster eléctrico a 220V
- Control inteligente: programa de temperaturas y horarios

- Precio en el mercado ecuatoriano: 1200 USD

Las dimensiones y parámetros fundamentales relacionados con el colector solar seleccionado se exponen en la tabla 3.6.

*Tabla 3.6. Dimensiones y Parámetros fundamentales para el cálculo de la eficiencia del colector*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores de los parámetros</b>
1. Longitud del colector	$l=2080$ mm
2. Ancho del colector	$a=1000$ mm
3. Altura del colector	$h=100$ mm
4. Inclinación del colector	$\theta=15^\circ$
5. Espesor de la lámina	$\delta=1,5$ mm
6. Distancia entre los tubos	$W=100$ mm
7. Diámetro de los tubos Interior Exterior	$D_i=8,71$ mm $D=9,52$ mm
8. Distancia entre el absorbente y el vidrio	70 mm
9. Grosor del vidrio	4 mm
10. Índice de refracción del vidrio $n$	$n_2=1,526$
11. Índice de refracción del aire	$n_1=1$
12. Coeficiente de extinción del vidrio	$K_{ext}=16m^{-1}$
13. Emitancia del vidrio	$\epsilon_c=0,88$
14. Emitancia del absorbente	$\epsilon_p=0,90$

15. Absorbitancia angular de la placa absorbente	$\alpha=0,90$
16. Flujo del agua a través del tubo	$G=0,02 \text{ Kg/s}$
17. Conductividad térmica del absorbente	$K_p=50\text{W/m}^\circ \text{K}$
18. Coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el tubo	$h_{fi}=1500 \text{ W/m}^{2^\circ}\text{K}$
19. Calor específico a presión constante del agua	$C_p=4,186\text{Joules/g }^\circ\text{K}$
20. Conductividad térmica del tubo	$250\text{W/m }^\circ\text{K}$
21. Conductividad térmica del aislante	$K=0,045 \text{ W/m }^\circ\text{K}$
22. Conductividad térmica de la soldadura	$C_b=102 \text{ W/m }^\circ\text{K}$
23. Grosor del aislante	$L=25\text{mm}$
24. Temperatura de la placa absorbedora	$T_p=85^\circ\text{C}=358^\circ\text{K}$
25. Temperatura ambiente máxima	$T_a = 22^\circ \text{C} = 295^\circ \text{K}$
26. Temperatura inicial de la cubierta	$T_c=(T_p+T_a)/2= 326^\circ \text{K}$
27. Velocidad del viento	$v=5\text{m/seg}$
28. Valor de la constante Stefan-Boltzman	$\sigma=5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^{2^\circ}\text{K}^4$

### 3.5. Resultados del cálculo de la eficiencia del colector

Los coeficientes de pérdida de calor por radiación y convección del colector seleccionado se representan en la figura 3.5.

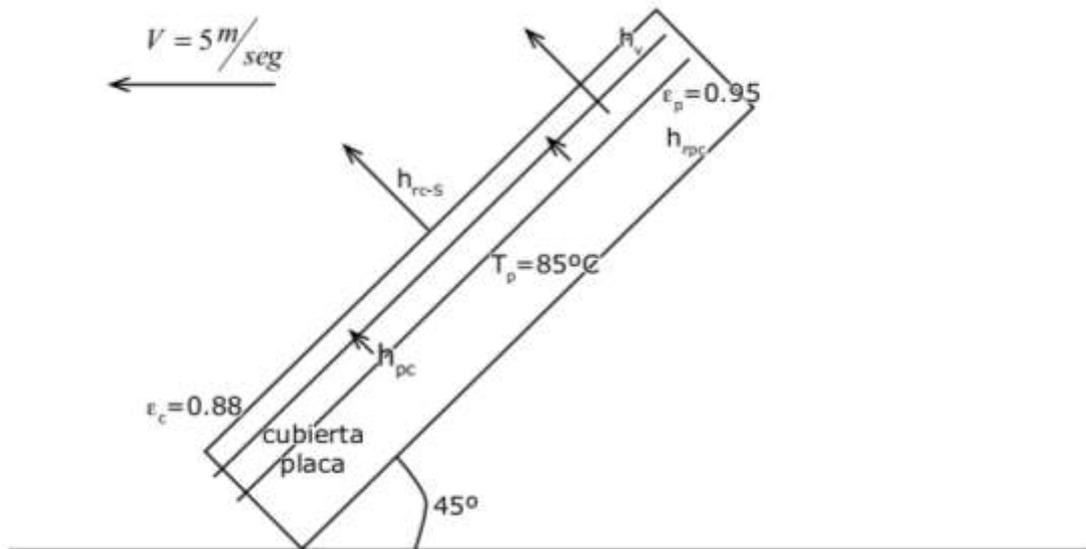


Figura 3.5. Coeficientes de pérdida de calor por radiación y convección para el colector solar plano seleccionado

Tabla 3.7. Resultados del cálculo de la eficiencia del colector seleccionado (primer proceso iterativo)

Parámetros	Resultados	Número de la ecuación
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y la placa absorbente	$h_{p-c} = 2,89 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.7
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie plana del colector y el aire ambiente	$h_v = 24,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.8
Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y la placa absorbente del colector	$h_{rp-c} = 7,3 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.27

Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el medio ambiente	$h_{rc-s} = 5,99 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.28
coeficiente global de pérdida de calor por la parte superior de la placa del colector al ambiente	$U_t = 7,64 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.29
Nuevo valor de la temperatura de la cubierta	$T_{ci} = 343 \text{ }^0\text{K}$	3.30

Tabla 3.8. Resultados del cálculo de la eficiencia del colector seleccionado (segundo proceso iterativo)

Parámetros	Resultados	Número de la ecuación
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora	$h_{p-c} = 2,26 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.7
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie plana del colector y el aire ambiente	$h_v = 24,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.8
Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora del colector	$h_{rp-c} = 8,22 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.27
Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el medio	$h_{rc-s} = 6,51 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.28

ambiente		
coeficiente global de pérdida de calor por la parte superior de la placa del colector al ambiente	$U_t = 7,85 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.29
Nuevo valor de la temperatura de la cubierta	$T_{c2} = 311 \text{ }^0\text{K}$	3.30

Tabla 3.9. Resultados del cálculo de la eficiencia del colector seleccionado (tercer proceso iterativo)

Parámetros	Resultados	Número de la ecuación
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora	$h_{p-c} = 3,28 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.7
Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie plana del colector y el aire ambiente	$h_v = 24,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.8
Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora del colector	$h_{rp-c} = 7,17 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.27
Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el medio ambiente	$h_{rc-s} = 5,56 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.28
coeficiente de pérdida de calor por la parte	$U_t = 7,76 \text{ W/m}^2\text{K}$	3.29

superior de la placa del colector al ambiente		
Nuevo valor de la temperatura de la cubierta	$T_{c3} = 311 \text{ }^0\text{K}$	3.30

Como el valor de la temperatura en la cubierta  $T_{c2}$  y  $T_{c3}$  coinciden, no es necesario continuar con el proceso iterativo, por lo que el coeficiente global de pérdidas por la parte superior de la cubierta es de:  $U_t = 7,76 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$ . En la tabla 3.10 se muestran los resultados del cálculo del coeficiente global de pérdida de calor ( $U_L$ )

*Tabla 3.10. Resultados del cálculo del coeficiente global de pérdidas, la eficiencia estándar del colector y el factor de calor removido.*

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>	<b>Número de la ecuación</b>
Coeficiente de pérdidas por la base del colector	$U_b = 0,9 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.22
Coeficiente de pérdidas por los lados	$U_e = 0,26 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.23
Coeficiente global de pérdidas en el colector solar plano	$U_L = 0,767 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.24
Eficiencia estándar de la placa del colector solar plano	$F = 0,846 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.31
Factor de eficiencia del colector plano	$F' = 0,857 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.32
Factor de calor removido	$F_R = 0,819 \text{ W/m}^2 \text{ }^0\text{K}$	3.33

### 3.6. Resultados del cálculo de la Absorción, reflexión y transmisión de la radiación en el colector solar plano

En la tabla 3.11 se exponen los resultados del cálculo de la absorción, reflexión y transmisión de la radiación para una superficie de vidrio con un índice de refracción de 1,526.

Tabla 3.11. Resultados del cálculo de la Absorción, reflexión y transmisión de la radiación en el colector solar plano

Parámetros	Resultados	Número de la ecuación
Reflexión de la radiación no polarizada (para ángulos entre $0^0$ y $40^0$ )	$\rho = 0.0434$	3.9
Transmitancia por reflexión del vidrio para ángulos comprendidos entre $0^0$ y $40^0$	$\tau_r = 0,917$	3.11
Para vidrio con 0,24 cm de grosor con coeficiente de extinción $K=0,16/cm$		
Transmitancia por absorción de la radiación	$\tau_a = 0,96$	3.14
Transmitancia por reflexión y absorción del vidrio	$\tau = 0,88$	3.13
Ángulo de refracción	$\theta_2 = 34,57^0$	3.10
Reflexión de la radiación no polarizada (para un ángulo de $60^0$ )	$\rho(60^0) = 0.093$	3.9
Transmitancia por reflexión del vidrio para un ángulo de $60^0$	$\tau_r(60^0) = 0,83$	3.11
La energía total absorbida por la placa Absorbente del colector	$\tau\alpha = 0,84$	3.16

En la tabla 3.12 se muestran los resultados calculados de la eficiencia teórica usando valores promedios de la radiación sola incidente tomados del INAMHI, el procedimiento expuesto en el capítulo II y los cálculos de pérdidas a partir del colector solar seleccionado.

*Tabla 3.12. Resultados teóricos de la eficiencia diaria en colectores solares planos para viviendas unifamiliares en la región de Guayaquil*

Hora	H (Wh/m <sup>2</sup> )	R	H.R (Wh/m <sup>2</sup> )	H.R( $\tau\alpha$ ) (Wh/m <sup>2</sup> )	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	$U_L(T_f - T_i)$ (Wh/m <sup>2</sup> )	q <sub>u</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )
7	52	0	0	0	9	60	-	-
8	240	1,56	374,4	314,5	12	60	428,2	0
9	446	1,417	632	530,9	15	60	401,4	106,1
10	635	1,36	863,6	725,4	18	60	374,6	287,3
11	726	1,335	969,2	814,1	20	60	356,8	374,5
12	768	1,327	1019,1	856	22	60	339	423,5
13	771	1,335	1029,3	864,6	25	60	312,2	452,4
14	667	1,36	907,1	761,9	21	60	347,9	339,1
15	372	1,417	527,1	442,7	17	60	383,6	48,4
16	342	1,56	533,5	448,1	13	60	419,2	23,6
17	155	0	0	0	11	60	-	-
Totales	6855,3			2054,9				
$\eta_{dia} = \frac{2054,9}{6855,3} = 29,9\%$								

Como se observa en la tabla 3.12 el valor de la eficiencia teórica, considerando los valores de radiación solar incidente y el colector solar seleccionado, es de 29,9 %. En el desarrollo

de aplicaciones que operan a base de energía solar, la única forma de obtener más energía por unidad de tiempo es aumentando el tamaño del área receptora y orientándola hacia el sol en lugar de que incida sobre la horizontal.

Una vez que la energía solar se convierte en calor y que se absorbe por el líquido, se debe aislar el absorbente térmicamente para prevenir pérdidas de calor. La parte posterior del absorbente así como los lados deben aislarse con fibra de vidrio o espuma de uretano. Sin embargo, en el caso del uretano, se debe usar una cobija de una pulgada de fibra de vidrio para protegerlo de las altas temperaturas. Las pérdidas de calor por el lado soleado del absorbente se reducen con una cubierta de vidrios. El vidrio transmite la radiación solar de alta energía (pequeñas longitudes de onda) hacia el absorbente y retarda la radiación de pequeña energía (grandes longitudes de onda) que es emitida por el absorbente caliente hacia el exterior, también evita que las corrientes de aire lo enfríen.

## **CAPÍTULO IV: EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES. PROPUESTA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO**

### **4.1. Objetivo**

Realizar una evaluación teórica y experimental de colectores de placa plana en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Guayaquil.

### **4.2. Estructura**

- Evaluación de la eficiencia energética
- Análisis de los resultados experimentales
- Valoración económica de la propuesta

#### **4.2.1 Evaluación de la eficiencia energética**

Luego de la selección y compra del colector solar plano de la firma ENERGOS, en el presente capítulo se realiza un análisis experimental del rendimiento del colector, el cálculo económico de la instalación y el tiempo de recuperación de la inversión a partir del ahorro de energía para el calentamiento de agua sanitaria en viviendas unifamiliares por concepto del uso de una fuente renovable. La cantidad de radiación del lugar, la exposición a tormentas y granizo, y la cantidad de espacio que se necesita, deben ser cuidadosamente examinadas cuando se tiene un sistema solar. Los costos específicos de los colectores también son importantes, además del uso adecuado para garantizar la efectividad del sistema solar.

#### 4.2.2 Procedimiento para el cálculo de la eficiencia real del colector seleccionado

La eficiencia de un colector solar se define como el cociente de la energía térmica útil frente a la energía solar total recibida. Además de las pérdidas térmicas existen las pérdidas ópticas.

El factor de conversión u eficiencia óptica indica que porcentaje de los rayos solares que penetran en la cubierta transparente del colector (la transmisión) es absorbido. Básicamente, es el producto de la tasa de transmisión de la cubierta y la tasa de absorción del absorbedor.

Según la norma INEN 2507 del 2009, para determinar la eficiencia instantánea del colector solar y garantizar su comportamiento bajo un amplio rango de temperaturas de operación, se debe obtener la curva de eficiencia real del sistema. Para ello se deben tomar valores de radiación incidente, temperatura ambiente, y de temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector solar, según la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} \cdot C_p (T_{fs} - T_{fi}) \cdot dt}{A_g \int_{t_1}^{t_2} G \cdot dt} \quad (4.1)$$

Donde:

$\dot{m}$  = flujo másico del fluido, kg/s

$C_p$  = Capacidad calorífica del fluido, kJ/kgK

$T_{fs}$  = Temperatura del fluido a la salida del colector,  $^{\circ}\text{K}$

$T_{fi}$  = Temperatura del fluido que ingresa al colector,  $^{\circ}\text{K}$

$A_g$  = Área de captación del colector,  $\text{m}^2$

$G$  = Radiación solar incidente,  $\text{W}/\text{m}^2$

$t_1, t_2$ = tiempo al inicio y final de un período de ensayo, en horas.

#### **4.2.3 Técnica experimental para determinar la eficiencia del colector solar plano.**

Los experimentos, para determinar la eficiencia del colector solar plano, se efectuaron fijando dos variables de entrada: el ángulo de inclinación del colector y la radiación solar incidente en función de la hora. Los niveles de cada variable se obtuvieron a partir de los parámetros de trabajo del colector solar y tomando en consideración las características del lugar donde está instalado el mismo. El colector solar usado en la experimentación es de la firma ENERGOS con un área de captación de  $2 \text{ m}^2$  y cubierta de vidrio. El colector solar usado en la experimentación se encuentra instalado en una vivienda unifamiliar en la ciudad de Guayaquil, ello permitió garantizar la semejanza geométrica, cinemática y dinámica en la instalación.

#### **4.2.4. Selección del ángulo de inclinación y orientación del colector solar plano**

El ángulo de inclinación óptimo de un colector solar depende de muchos factores, entre ellos la radiación incidente en el lugar donde va situada la instalación, declinación latitud geográfica, inclinación, orientación, ángulo horario y las interferencias que tenga ya sea por edificios, montañas adyacentes. En el cálculo de la eficiencia del colector solar plano, se seleccionaron tres valores de inclinación, considerando que la latitud del ecuador se mantiene cercana a  $0^0$ , los ángulos seleccionados fueron:  $5^0$ ,  $15^0$  y  $25^0$ . Según la literatura el ángulo óptimo se encuentra en un valor entre 10 y 15 grados por encima de la latitud del lugar. La orientación del colector se realiza hacia el norte en la dirección de salida del sol.

Los valores de esta variable se cambiaron cada 5 días para garantizar que en cada mes se tuvieran los resultados de los tres valores del ángulo de inclinación.

#### 4.2.5 Cálculo de la radiación solar incidente y el número de corridas experimentales

La radiación solar incidente varía en función de la hora, el lugar y las condiciones climatológicas, en la experimentación efectuada se realizaron mediciones desde las 7AM hasta las 7PM durante los primeros 15 días de los meses de junio y julio del 2016. El número de corridas experimentales se obtuvo mediante un diseño multifactorial, de acuerdo con los niveles prefijados de cada una de las variables suma un número de 12 mediciones diarias en función del ángulo de inclinación. Considerando que se realizaron mediciones durante 30 días, el total de experimentos efectuados fue de 360; pero con el objetivo de comprobar la validez de los experimentos y disminuir los errores de observación, en todos los niveles se efectuaron 3 réplicas, lo que concluye con un total de 1080 corridas experimentales. En la tabla 4.1 se muestra un resumen del diseño experimental efectuado.

*Tabla 4.1. Matriz del diseño experimental seleccionado*

<b>Cantidad de experimentos</b>	<b>Ángulo de inclinación</b>	<b>Hora del día para la toma de la radiación solar incidente</b>
120	5 <sup>0</sup>	Desde 7AM hasta 7PM (12 horas diarias)
120	15 <sup>0</sup>	Desde 7AM hasta 7PM (12 horas diarias)
120	25 <sup>0</sup>	Desde 7AM hasta 7PM (12 horas diarias)
Total de corridas experimentales: 360		

#### 4.3. Análisis de los resultados experimentales

En la tabla 4.2 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día primero de junio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de  $5^{\circ}$ . En todos los casos el flujo másico de agua a través del colector es de 0,0305kg/s.

*Tabla 4.2. Eficiencia del colector solar para el día primero de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $5^{\circ}$  (fuente: el autor).*

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	1961	20	25	14,9
08	1210	20	26,1	18,7
09	2407	20,5	27	19,3
10	2980	21	29,8	25,5
11	3980	21,3	32,1	27,6
12	3983	21,6	35,6	34,0
13	3994	22,1	40,3	35,5
14	3996	22,3	42	35,6
15	3876	22,2	40,2	35,4
16	3415	22,1	37,8	33,9
17	2615	21,5	34,2	29,1
18	1965	21,3	27,4	16,1
19	1912	21,1	27,1	15,9
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,3 %</b>

Los valores de eficiencia varían en el rango de 14,9 % y 35,6 %, la temperatura máxima del agua a la salida del colector es  $42^{\circ}\text{C}$  en el horario entre las 13:00 y 14:00 horas, se

observa un incremento de la temperatura de salida del agua con el incremento de la radiación solar incidente, el valor promedio de eficiencia en el colector para el día primero de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $5^{\circ}$  es de 26,3%.

*Tabla 4.3. Eficiencia del colector solar para el día 6 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $15^{\circ}$  (fuente: el autor).*

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2129	19,8	25,8	18,0
08	2066	19,8	26,7	21,3
09	2136	20,3	27,6	21,8
10	2191	20,8	30,4	28,0
11	2486	21,1	32,7	29,8
12	2611	21,4	36,2	36,2
13	3254	21,9	40,9	37,2
14	3511	22,1	42,6	37,2
15	3226	22	40,8	37,2
16	2940	21,9	38,4	35,8
17	2773	21,3	34,8	31,0
18	2398	21,1	28	18,3
19	2389	20,9	27,7	18,1
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>28,5 %</b>

En la tabla 4.3 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día 6 de junio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de  $15^{\circ}$ . Los valores de eficiencia varían en

el rango de 18 % y 37,2 %, la temperatura máxima del agua a la salida del colector es 42,8 °C en el horario entre las 14:00 y 15:00 horas. El valor promedio de eficiencia es de 28,5%.

*Tabla 4.4. Eficiencia del colector solar para el día 11 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25° (fuente: el autor).*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2166	20,3	24,1	11,2
08	2103	20,3	25,2	14,9
09	2173	20,8	26,1	15,6
10	2228	21,3	28,9	21,8
11	2523	21,6	31,2	24,3
12	2648	21,9	34,7	30,9
13	3291	22,4	39,4	33,0
14	3548	22,6	41,1	33,3
15	3263	22,5	39,3	32,8
16	2977	22,4	36,9	31,1
17	2810	21,8	33,3	26,1
18	2435	21,6	26,5	12,8
19	2426	21,4	26,2	12,6
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>23,1 %</b>

En la tabla 4.4 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día 11 de junio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de 25°. Los valores de eficiencia varían en el rango de 11,2 % y 33,3 %, la temperatura máxima del agua a la salida del colector es

41,1 °C en el horario entre las 13:00 y 14:00 horas. El valor promedio de eficiencia es de 23,1%.

*Tabla 4.5. Eficiencia del colector solar para el día primero de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5° (fuente: el autor).*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2157	20,3	25,4	15,1
08	2117	20,2	26,2	18,1
09	2140	20,6	27,1	19,4
10	2219	21,2	29,9	25,0
11	2532	21,4	32,4	27,7
12	2641	21,7	35,7	33,8
13	3272	22,2	40,4	35,5
14	3565	22,4	42,3	35,6
15	3267	22,4	40,4	35,1
16	2987	22,3	37,9	33,3
17	2795	21,6	34,6	29,7
18	2435	21,4	27,5	16,0
19	2467	21,2	27,3	15,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,2 %</b>

En la tabla 4.5 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día primero de julio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de 5°. Los valores de eficiencia en varían en el rango de 15,1 % y 35,6 %, la temperatura máxima del agua a la salida del

colector es 42,3 °C en el horario entre las 13:00 y 14:00 horas. El valor promedio de eficiencia es de 26,2 %.

*Tabla 4.6. Eficiencia del colector solar para el día 6 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15° (fuente: el autor).*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2133	19,9	26,5	19,7
08	2093	19,8	27,3	22,9
09	2116	20,2	28,2	24,1
10	2195	20,8	31	29,7
11	2508	21	33,5	31,8
12	2617	21,3	36,8	37,8
13	3248	21,8	41,5	38,7
14	3541	22	43,4	38,5
15	3243	22	41,5	38,3
16	2963	21,9	39	36,8
17	2771	21,2	35,7	33,4
18	2411	21	28,6	20,1
19	2443	20,8	28,4	19,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>30,12 %</b>

En la tabla 4.6 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día 6 de julio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de 15°. Los valores de eficiencia en varían en el rango de 19,7 % y 38,7 %, la temperatura máxima del agua a la salida del colector es

43,4 °C en el horario entre las 13:00 y 14:00 horas. El valor promedio de eficiencia es de 30,12 %.

*Tabla 4.7. Eficiencia del colector solar para el día 11 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25° (fuente: el autor).*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2164	20,7	24,9	12,4
08	2124	20,6	25,7	15,3
09	2147	21	26,6	16,7
10	2226	21,6	29,4	22,4
11	2539	21,8	31,9	25,4
12	2648	22,1	35,2	31,6
13	3279	22,6	39,9	33,7
14	3572	22,8	41,8	33,9
15	3274	22,8	39,9	33,3
16	2994	22,7	37,4	31,3
17	2802	22	34,1	27,5
18	2442	21,8	27	13,6
19	2474	21,6	26,8	13,4
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>23,9 %</b>

En la tabla 4.7 se exponen los resultados de las mediciones efectuadas el día 11 de julio del 2016 con un ángulo de inclinación del colector de 25°. Los valores de eficiencia en varían en el rango de 12,4 % y 33,9 %, la temperatura máxima del agua a la salida del colector es

41,8 °C en el horario entre las 13:00 y 14:00 horas. El valor promedio de eficiencia es de 23,9 %.

En la figura 4.4 se muestra el comportamiento de la eficiencia para los diferentes ángulos de inclinación ( $5^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ) correspondiente al mes de junio del 2016. Se observa que los máximos valores de eficiencia pertenecen a un ángulo de inclinación de 15 grados, el valor de la eficiencia promedio es de 28,5 %.

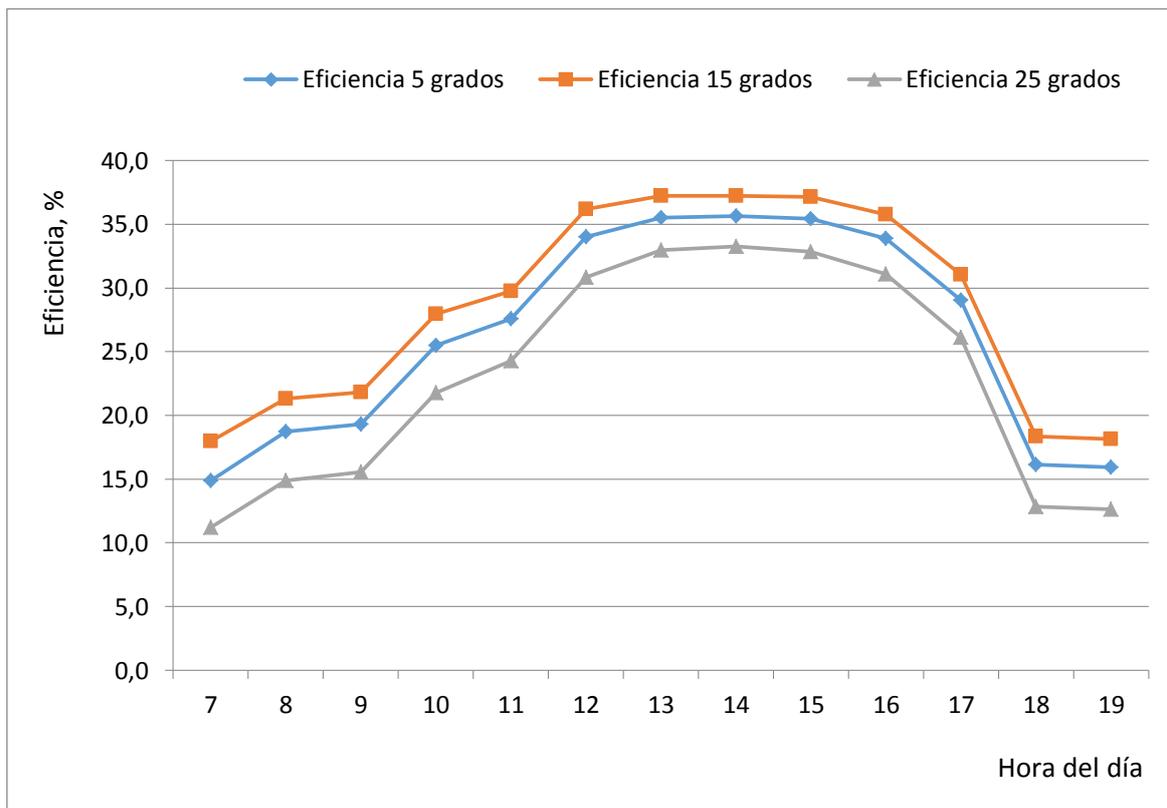


Figura 4.4. Eficiencia del colector solar para los días 1, 6, 11 de junio del 2016, con diferentes ángulos de inclinación (fuente: el autor)

En la figura 4.5 se muestra el comportamiento de la eficiencia para los diferentes ángulos de inclinación ( $5^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ) correspondiente al mes de julio del 2016. Se observa que los máximos valores de eficiencia pertenecen a un ángulo de inclinación de 15 grados, el valor de la eficiencia promedio es de 30,12 %.

Después del análisis de las gráficas anteriores (figura 4.4 y 4.5) se observa que el ángulo de inclinación del colector donde se alcanza la máxima eficiencia es de  $15^{\circ}$ , ello coincide con los criterios de la literatura donde se establece que el ángulo de inclinación del colector debe estar entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  por encima de la latitud del lugar.

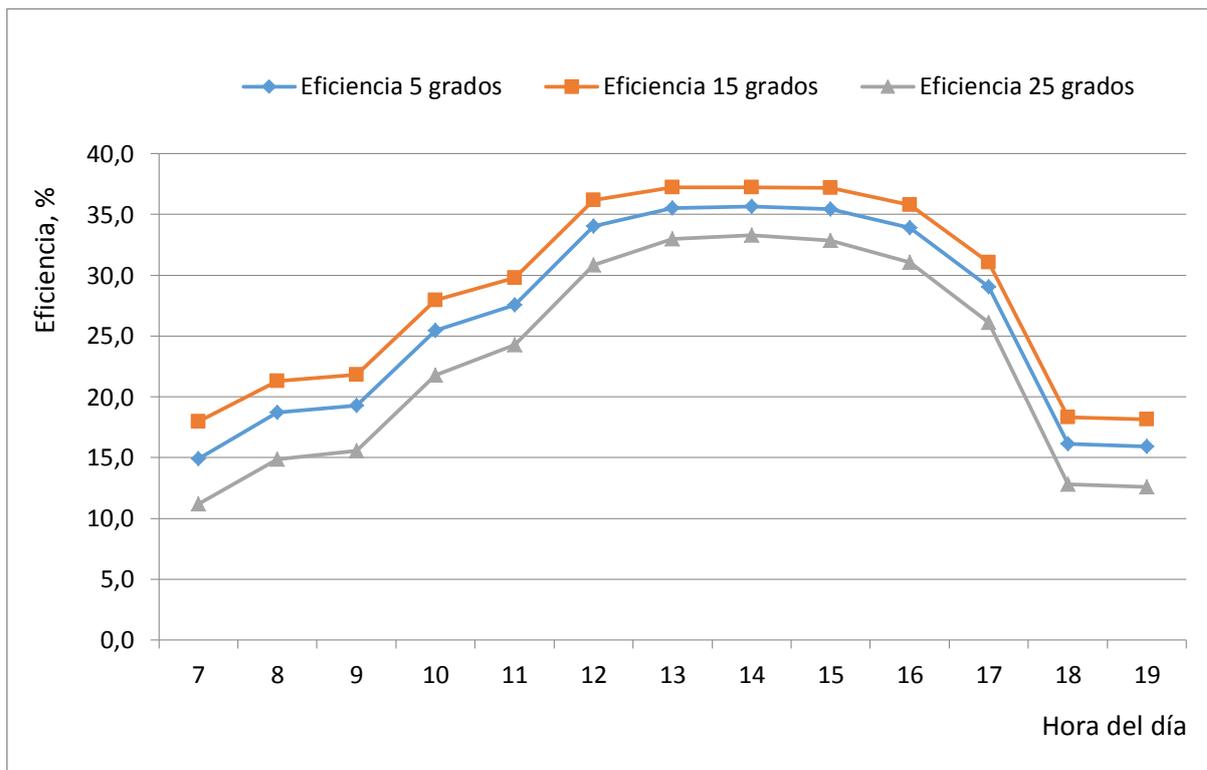


Figura 4.5. Eficiencia del colector solar para los días 1, 6, 11 de julio del 2016, con diferentes ángulos de inclinación (fuente: el autor)

#### 4.4. Valoración económica de la propuesta

Tabla 4.8. Costo total de la compra e instalación del colector solar plano para el calentamiento de agua.

<b>Descripción</b>	<b>Costo unitario (USD)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo total (USD)</b>
Colector solar ENERGOS	1239,00	1	1239,00
Llave $\frac{3}{4}$ plástica	1,15	1	1,15
Tapón $\frac{3}{4}$ plástico	0,60	1	0,60
Neplo de $\frac{3}{4}$ plástico	0,60	6	3,60
Teflón	1,00	1	1,00
Acople de manguera	0,80	1	0,80
Electrodos 6011	2,45	1 libra	2,45
Discos de corte	1,50	2	3,00
Pernos y brocas	0,675	4	2,70
Pernos de $\frac{1}{2}$ con tuerca	0,875	2	1,75
Broca de media	4,00	1	4,00
Nivel y sierra	7,35	1	7,35
Pintura y brocha	1,60	1	1,60
<b>Costo total de la instalación incluyendo el IVA</b>			<b>1273,15</b>

En la tabla 4.8 se muestra el costo total de la compra e instalación de un panel solar en una vivienda unifamiliar, como se observa el valor total de misma es de 1273,15 USD. A continuación se analiza el tiempo de recuperación de la inversión.

#### 4.4.1 Tiempo de recuperación de la inversión

La cantidad de agua caliente a una temperatura de 40<sup>0</sup>C, que consume diario una familia de 5 personas es de 200 litros (0,2 m<sup>3</sup>). La cantidad de energía que se necesita para el calentamiento de 200 litros de agua en una vivienda por concepto del uso del colector solar plano se calcula por la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot \rho \cdot Cp \cdot (Ts - Te) \quad (4.1)$$

Donde:

V= Volumen de agua a calentar, m<sup>3</sup>.

$\rho$ = Densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>.

Cp= Capacidad calorífica del agua a la temperatura media de entrada y salida del colector, 4,186 kJ/kgK.

Ts= Temperatura de salida del agua del colector. Para el análisis se tomó un valor promedio de la temperatura para un día de trabajo del colector solar, 40<sup>0</sup>C.

Te= Temperatura de entrada del agua al colector, 20<sup>0</sup>C.

La cantidad de energía que se consume por concepto del uso del colector solar para el calentamiento de agua es de 16744 kJ. Si esta energía se gasta con el uso del GLP, considerando el valor calórico del mismo que es de 45343 kJ/kg, el consumo de GLP diario sería de 0,369 kg.

El costo promedio sin subsidio del cilindro de 15 kg de GLP es de 20 USD, por lo que el ahorro diario por concepto del uso del colector solar plano para el calentamiento del agua en una vivienda unifamiliar es de 0,492 USD/día, esto equivale a un ahorro de 14,76 USD/mes y 177,12 USD/año. El tiempo de recuperación de la inversión por concepto de ahorro energético en el uso de una fuente renovable de energía es de 7,19 años, a ello es necesario añadir el casi nulo impacto ambiental que provoca el uso de este tipo de energía y la durabilidad estimada de los colectores solares planos que es de 25 años. Por lo anteriormente planteado se considera viable el proyecto para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares con el uso de colectores solares planos.

## CONCLUSIONES

- Se estableció el marco teórico de sustento de la investigación a través de los principales fundamentos teóricos asociados con los colectores solares de placa plana, el valor de eficiencia teórica considerando los valores de radiación solar incidente y el colector solar seleccionado, fue de 29,9 %. En el desarrollo de aplicaciones que operan a base de energía solar, la única forma de obtener más energía por unidad de tiempo es aumentando el tamaño del área receptora y orientándola hacia el sol en lugar de que incida sobre la horizontal.
- Se obtuvo el procedimiento teórico que permitió la selección de colectores solares de placa plana en viviendas unifamiliares para las condiciones de la ciudad de Guayaquil, considerando el ángulo de inclinación del colector donde se alcanza la máxima eficiencia es de  $15^{\circ}$ , ello coincide con los criterios de la literatura donde se establece que el ángulo de inclinación del colector debe estar entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  por encima de la latitud del lugar.
- Se realizó la evaluación experimental de un colector solar de placa plana en una vivienda unifamiliar compuesta de 5 personas, la eficiencia promedio máxima lograda de forma experimental en el colector solar plano es de 30,12 %.
- Se efectuó la propuesta aplicable al calentamiento de agua para viviendas unifamiliares mediante el uso de colectores solares de placa plana, en donde el tiempo de recuperación de la inversión por concepto de ahorro energético en el uso de una fuente renovable de energía es de 7,19 años, a ello es necesario añadir el casi nulo impacto ambiental que provoca el uso de este tipo de energía y la durabilidad estimada de los colectores solares planos que es de 25 años. Por lo anteriormente planteado se considera viable el proyecto para el calentamiento de agua en viviendas unifamiliares con el uso de colectores solares planos.

## RECOMENDACIONES

- Realizar mediciones experimentales de la radiación solar incidente y de los parámetros de trabajo del colector para determinar la eficiencia en diferentes épocas del año con el objetivo de mayor conocimiento en la captación de este tipo de energía renovable en la provincia de Guayas.
- Realizar el análisis de la eficiencia de la instalación mediante el uso de otros ángulos de inclinación del colector con una variabilidad de  $1^{\circ}$  de inclinación, ello permite mejor orientación de la instalación y mayor captación de la energía solar incidente.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Ávila G. A., Jorge M. F., Julio B. S. Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta. *Revista Ingeniería y Desarrollo* Vol. 27: 93 – 112, 2010.
2. Barcia L. A. Dynamic Modeling of the Solar Field in Parabolic Trough Solar Power Plants. *Journals of Energies* Vol. 8 (12), 2015. **ISSN:** 1996-1073
3. Bériz L. y M. Álvarez. Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares. Editorial CUBASOLAR. ISBN: 978-959-7113-36-2. P.168. Cuba, 2008.
4. Binotti M., G. Manzolini, G. Zhu. An alternative methodology to treat solar radiation data for the optical efficiency estimate of different types of collectors. *Journal of Solar Energy*. Vol. 110: 807 – 817, 2014.
5. Conde M. S. Diseño de un calentador solar de placa de calor para calentamiento de agua para uso doméstico. Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, 2014.
6. Deng J., Xudong Y., Pengsu W. Study on the second-order transfer function models for dynamic tests of flat-plate solar collectors Part I: A proposed new model and a fitting methodology. *Journal of Solar Energy*. Vol. 114: 418 – 426, 2015.
7. Eismann R. Accurate analytical modeling of flat plate solar collectors: Extended correlation for convective heat loss across the air gap between absorber and cover plate. *Journal of Solar Energy*. Vol. 122: 1214–1224, 2015.
8. Escoda S. Manual Técnico Energía Solar Térmica. Disponible en [www.salvadorescoda.com](http://www.salvadorescoda.com). Publicaciones ECOSOL, España, 2011.

9. Facão J. Optimization of flow distribution in flat plate solar thermal collectors with riser and header arrangements. *Journal of Solar Energy*. Vol. 120: 104–112, 2015.
10. García D. J. Diseño de una instalación solar térmica multipropósito para un edificio de viviendas en Zaragoza. Tesis de Ingeniería. Universidad de Carlos III. Madrid, España, 2009.
11. Helal O., B. Chaouachi, S. Gabsi and C. Bouden. Energetic Performances Study of an Integrated Collector Storage Solar Water Heater. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 3 (1): 152-158, 2010.
12. Henshall P., F. Arya, P. Eames, T. Hyde, R. Moss, S. Shire. Constant temperature induced stresses in evacuated enclosures for high performance flat plate solar thermal collectors. *Journal of Solar Energy*, Vol.127: 250–26, 2016.
13. Holm D. A. Un Futuro Para el Mundo en Desarrollo Basada en las Fuentes Renovables de Energía. Obtenida el 10 de octubre de 2015. <http://mba.americaeconomia.com/biblioteca/papers/un-futuro-para-el-mundo-en-desarrollo-basado-en-las-fuentes-renovables-de-energia>.
14. Incropera, F. P. & David P. W. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons. 2011. New York. U.S.A. p. 886. ISBN 13 978-0470-50197-9.
15. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Anuario Meteorológico (INAMHI), Quito, Ecuador, 2015. Disponible en <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
16. Kalogirou S. Simple Validation Method of a TRNSYS Model for a Thermosyphon Solar Water Heating System. *Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1102 – 1106, Nicosia, Chipre, 2000.

17. Llorente C. J. Proyecto de instalación de Energía Solar Térmica para producción de agua caliente sanitaria en edificio de 12 viviendas. Tesis de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, Colombia, 2012.
18. Marroquín J A. Determinación experimental y teórica de temperaturas en un colector solar plano para calentamiento de agua para uso doméstico y su optimización en el diseño. Tesis Doctoral. Instituto Politécnico Nacional. Querétaro, 2008. México.
19. Martínez E. J., P. Franco, R. Alonso. Manual Técnico de Energía Solar Térmica Volumen I y II. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.. 2014. ISBN: 978-9974-0-0910-3, Uruguay.
20. Olivares R. Determinación experimental y teórica de temperaturas para un colector solar plano y su implementación matemática en una herramienta computacional para la optimización del diseño. Congreso Internacional Cubasolar, Cuba, 2010.
21. Overend, M., Zammit, K. A computer algorithm for determining the tensile strength of float glass. *Eng. Struct.* 45, 68–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.039>. 2012.
22. Paz G. J. Colectores solares planos, tratamiento teórico, volumen 1. Instituto de Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 116 p. ISBN: 968-7845-78-3, 2005.
23. Plana I. M., J.R. Polo, J.L. Rosell. Tecnología solar, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid-Barcelona-México, 2005. España. ISBN: 9788484761990.

24. Salamanca F. Z. Instalación solar térmica para producción de ACS en edificio de viviendas en Salamanca. Tesis de Ingeniería. Universidad de Carlos III. Madrid, España, 2009.
25. Sallaberrya F., R. Pujol, A. García, V. Martínez. Toward a standard testing methodology for solar thermal collectors with variable-geometry: The direct radiation incidence angle modifier issue. *Journal of Solar Energy*. Vol. 121: 31–40, 2015.
26. Smith C. C. Design application of the Hottel-Whillier-Bliss Equation. *Journal Solar Energy*, Vol 19: 109 -113. 1977. ISSN: 0038-0923.
27. Sopian K. S., W. R. W Daud, M. Y. Othman y B. Ya-tim, “Thermal performance of the double-pass solar collector with and without porous media”, *Renewable Energy*, vol. 18, no. 4, pp. 557-64, 1999.
28. Souliotis, M. and Y. Tripanagnostopoulos. Experimental study of CPC type ICS solar systems. *Journal of Solar Energy*, 76: 389-408, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2003.10.003
29. Souliotis, M., S. Kalogirou and Y. Tripanagnostopoulos. Modeling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS. *Renew. Journal of Energy*, 34: 1333-1339, 2009. DOI: 10.1016/j.renene.2008.09.007.
30. Tripanagnostopoulos, Y. and M. Souliotis. ICS solar systems with horizontal (E-W) and vertical (N-S) cylindrical water storage tank. *Renew. Journals of Energy*, 29: 73-96, 2015. DOI: 10.1016/S0960-1481(03)00144-7.
31. Vandebroek, M., Belis, J., Louter, C., Van Tendeloo, G. Experimental validation of edge strength model for glass with polished and cut edge finishing. *Eng.*

- Fract. Mech. 96, 480–489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.08.019>. 2012.
32. Verdeza A. V., Jorge M. F., Rafael G. V., Adrián A. G. Colector solar de placa plana de paso doble con lecho poroso. *Revista Visión Electrónica* Vol. 7(2): 57 – 66, 2013.
33. Zalamea E. Z. y Rodrigo G. A. Diseño arquitectónico integrado de sistemas solares térmicos en techumbres de viviendas. *Revista Arquitectura y Urbanismo* vol. XXXV, no 3, 2014, ISSN 1815-5898.

**ANEXO 1.** *Eficiencia del colector solar para el día 2 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2089	19,7	25,6	18,0
08	2109	20,1	26,4	19,1
09	2158	20,6	27,7	21,0
10	2205	20,8	29,9	26,3
11	2530	21,1	32,1	27,7
12	2648	21,4	35,4	33,7
13	3345	22,3	40,1	33,9
14	3562	22,5	42,5	35,8
15	3254	22,1	40,8	36,7
16	2978	21,8	37,9	34,5
17	2794	21,3	34,1	29,2
18	2435	21,5	27,2	14,9
19	2408	20,9	27	16,1
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,7 %</b>

**ANEXO 2.** Eficiencia del colector solar para el día 7 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $15^{\circ}$ .

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2076	19,9	26,4	20
08	2096	20,3	27,2	21
09	2145	20,8	28,5	22,9
10	2192	21	30,7	28,2
11	2517	21,3	32,9	29,4
12	2635	21,6	36,2	35,3
13	3332	22,5	40,9	35,2
14	3549	22,7	43,3	37,0
15	3241	22,3	41,6	38,0
16	2965	22	38,7	35,9
17	2781	21,5	34,9	30,7
18	2422	21,7	28	16,6
19	2395	21,1	27,8	17,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>28,32 %</b>

**ANEXO 3.** *Eficiencia del colector solar para el día 12 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2110	20	25	15,1
08	2130	20,4	25,8	16,2
09	2179	20,9	27,1	18,2
10	2226	21,1	29,3	23,5
11	2551	21,4	31,5	25,3
12	2669	21,7	34,8	31,3
13	3366	22,6	39,5	32,0
14	3583	22,8	41,9	34,0
15	3275	22,4	40,2	34,7
16	2999	22,1	37,3	32,3
17	2815	21,6	33,5	27,0
18	2456	21,8	26,6	12,5
19	2429	21,2	26,4	13,6
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>24,29 %</b>

**ANEXO 4.** Eficiencia del colector solar para el día 3 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $5^{\circ}$ .

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2081	19,9	25,5	17,2
08	2115	20,3	26,2	17,8
09	2153	20,4	27,3	20,5
10	2235	20,6	29,4	25,1
11	2539	21,2	32,6	28,6
12	2654	21,1	35,1	33,7
13	3361	22,3	39,9	33,4
14	3587	22,3	42,1	35,2
15	3254	22	40,6	36,5
16	2981	21,7	37,5	33,8
17	2787	21,3	34,1	29,3
18	2417	21,4	27,4	15,8
19	2413	20,7	26,9	16,4
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,4 %</b>

**ANEXO 5.** *Eficiencia del colector solar para el día 8 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2068	20,1	26,3	19,1
08	2102	20,5	27	19,7
09	2140	20,6	28,1	22,4
10	2222	20,8	30,2	27,0
11	2526	21,4	33,4	30,3
12	2641	21,3	35,9	35,3
13	3348	22,5	40,7	34,7
14	3574	22,5	42,9	36,4
15	3241	22,2	41,4	37,8
16	2968	21,9	38,3	35,2
17	2774	21,5	34,9	30,8
18	2404	21,6	28,2	17,5
19	2400	20,9	27,7	18,1
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>28,02 %</b>

**ANEXO 6.** Eficiencia del colector solar para el día 13 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2102	20,2	24,9	14,3
08	2136	20,6	25,6	14,9
09	2174	20,7	26,7	17,6
10	2256	20,9	28,8	22,4
11	2560	21,5	32	26,2
12	2675	21,4	34,5	31,3
13	3382	22,6	39,3	31,5
14	3608	22,6	41,5	33,4
15	3275	22,3	40	34,5
16	3002	22	36,9	31,7
17	2808	21,6	33,5	27,0
18	2438	21,7	26,8	13,3
19	2434	21	26,3	13,9
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>23,99 %</b>

**ANEXO 7.** Eficiencia del colector solar para el día 4 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $5^{\circ}$ .

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2079	20,6	25,8	16,0
08	2119	21,1	26,6	16,6
09	2167	20,4	27,5	20,9
10	2256	20,3	29,4	25,7
11	2576	21,1	32,6	28,5
12	2651	21	34,7	33,0
13	3318	22,1	39,7	33,8
14	3565	22,5	42,5	35,8
15	3251	22,2	40,4	35,7
16	2965	21,3	37,2	34,2
17	2776	21,1	34,5	30,8
18	2431	21,6	31,4	25,7
19	2420	20,9	26,9	15,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>27,11 %</b>

**ANEXO 8.** *Eficiencia del colector solar para el día 9 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2066	20,8	26,6	17,9
08	2106	21,3	27,4	18,5
09	2154	20,6	28,3	22,8
10	2243	20,5	30,2	27,6
11	2563	21,3	33,4	30,1
12	2638	21,2	35,5	34,6
13	3305	22,3	40,5	35,1
14	3552	22,7	43,3	37,0
15	3238	22,4	41,2	37,0
16	2952	21,5	38	35,6
17	2763	21,3	35,3	32,3
18	2418	21,8	32,2	27,4
19	2407	21,1	27,7	17,5
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>28,73 %</b>

**ANEXO 9.** Eficiencia del colector solar para el día 14 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2100	20,9	25,2	13,1
08	2140	21,4	26	13,7
09	2188	20,7	26,9	18,1
10	2277	20,6	28,8	23,0
11	2597	21,4	32	26,1
12	2672	21,3	34,1	30,6
13	3339	22,4	39,1	31,9
14	3586	22,8	41,9	34,0
15	3272	22,5	39,8	33,7
16	2986	21,6	36,6	32,0
17	2797	21,4	33,9	28,5
18	2452	21,9	30,8	23,1
19	2441	21,2	26,3	13,3
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>24,7 %</b>

**ANEXO 10.** *Eficiencia del colector solar para el día 5 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2086	20,7	25,9	15,9
08	2131	21,2	26,7	16,5
09	2194	20,1	27,8	22,4
10	2271	20,4	29,6	25,9
11	2583	21,1	32,2	27,4
12	2668	21,1	34,9	33,0
13	3325	22,6	39,6	32,6
14	3519	21,6	42,2	37,3
15	3267	22,2	40,9	36,5
16	2987	21,7	37,7	34,2
17	2794	21,5	34,8	30,4
18	2469	21,2	31,9	27,6
19	2437	20,7	27,3	17,3
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>27,46 %</b>

**ANEXO 11.** *Eficiencia del colector solar para el día 10 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2073	20,9	26,7	17,9
08	2118	21,4	27,5	18,4
09	2181	20,3	28,6	24,3
10	2258	20,6	30,4	27,7
11	2570	21,3	33	29,0
12	2655	21,3	35,7	34,6
13	3312	22,8	40,4	33,9
14	3506	21,8	43	38,6
15	3254	22,4	41,7	37,8
16	2974	21,9	38,5	35,6
17	2781	21,7	35,6	31,9
18	2456	21,4	32,7	29,3
19	2424	20,9	28,1	18,9
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>29,06 %</b>

**ANEXO 12.** Eficiencia del colector solar para el día 15 de junio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2107	21	25,3	13,0
08	2152	21,5	26,1	13,6
09	2215	20,4	27,2	19,6
10	2292	20,7	29	23,1
11	2604	21,4	31,6	25,0
12	2689	21,4	34,3	30,6
13	3346	22,9	39	30,7
14	3540	21,9	41,6	35,5
15	3288	22,5	40,3	34,5
16	3008	22	37,1	32,0
17	2815	21,8	34,2	28,1
18	2490	21,5	31,3	25,1
19	2458	21	26,7	14,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>25,06 %</b>

**ANEXO 13.** *Eficiencia del colector solar para el día 2 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2164	20,1	25,3	15,3
08	2131	20,4	26,4	18,0
09	2162	20,2	27,1	20,4
10	2243	21,5	29,6	23,0
11	2557	21,1	32,6	28,7
12	2617	21,6	35,8	34,6
13	3252	22,3	40,3	35,3
14	3518	22	42,2	36,6
15	3281	22,5	40,1	34,2
16	2954	22,2	37,7	33,5
17	2743	21,4	34,9	31,4
18	2487	21,6	29,7	20,8
19	2471	21	27,1	15,7
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,73 %</b>

**ANEXO 14.** Eficiencia del colector solar para el día 7 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $15^{\circ}$ .

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2140	19,7	26,4	20,0
08	2107	20	27,5	22,7
09	2138	19,8	28,2	25,1
10	2219	21,1	30,7	27,6
11	2533	20,7	33,7	32,7
12	2593	21,2	36,9	38,6
13	3228	21,9	41,4	38,5
14	3494	21,6	43,3	39,6
15	3257	22,1	41,2	37,4
16	2930	21,8	38,8	37,0
17	2719	21	36	35,2
18	2463	21,2	30,8	24,8
19	2447	20,6	28,2	19,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>30,7 %</b>

**ANEXO 15.** *Eficiencia del colector solar para el día 12 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2171	20,5	24,8	12,6
08	2138	20,8	25,9	15,2
09	2169	20,6	26,6	17,7
10	2250	21,9	29,1	20,4
11	2564	21,5	32,1	26,4
12	2624	22	35,3	32,3
13	3259	22,7	39,8	33,5
14	3525	22,4	41,7	34,9
15	3288	22,9	39,6	32,4
16	2961	22,6	37,2	31,5
17	2750	21,8	34,4	29,2
18	2494	22	29,2	18,4
19	2478	21,4	26,6	13,4
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>24,46 %</b>

**ANEXO 16.** *Eficiencia del colector solar para el día 3 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2170	20,5	25,7	15,3
08	2191	20,1	26,9	19,8
09	2204	20,5	27,9	21,4
10	2246	21,3	29,9	24,4
11	2587	21,6	33,4	29,1
12	2635	21,4	36,5	36,6
13	3286	22,5	40,5	34,9
14	3534	22,3	42,2	35,9
15	3321	22,2	40,3	34,8
16	3150	22,5	37,9	31,2
17	2943	21,6	35,4	29,9
18	2587	21,7	29,9	20,2
19	2499	21,4	27,8	16,3
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,91 %</b>

**ANEXO 17.** Eficiencia del colector solar para el día 8 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $15^{\circ}$ .

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2146	20,1	26,8	19,9
08	2167	19,7	28	24,4
09	2180	20,1	29	26,1
10	2222	20,9	31	29,0
11	2563	21,2	34,5	33,1
12	2611	21	37,6	40,6
13	3262	22,1	41,6	38,1
14	3510	21,9	43,3	38,9
15	3297	21,8	41,4	37,9
16	3126	22,1	39	34,5
17	2919	21,2	36,5	33,4
18	2563	21,3	31	24,1
19	2475	21	28,9	20,3
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>30,8 %</b>

**ANEXO 18.** *Eficiencia del colector solar para el día 13 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2177	20,9	25,2	12,6
08	2198	20,5	26,4	17,1
09	2211	20,9	27,4	18,8
10	2253	21,7	29,4	21,8
11	2594	22	32,9	26,8
12	2642	21,8	36	34,3
13	3293	22,9	40	33,1
14	3541	22,7	41,7	34,2
15	3328	22,6	39,8	33,0
16	3157	22,9	37,4	29,3
17	2950	22	34,9	27,9
18	2594	22,1	29,4	17,9
19	2506	21,8	27,3	14,0
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>24,69 %</b>

**ANEXO 19.** Eficiencia del colector solar para el día 4 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de  $5^{\circ}$ .

Hora	Radiación solar, G (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura de entrada del agua, °C	Temperatura de salida del agua, °C	Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)
07	2140	20	25,9	17,6
08	2187	20,2	26,4	18,1
09	2228	20,4	28,3	22,6
10	2269	21,5	31,4	27,8
11	2672	21,6	33,7	28,9
12	2787	21,6	36,8	34,8
13	3184	22,1	40,1	36,1
14	3572	22,1	41,2	34,1
15	3438	22,3	40,3	33,4
16	3172	22,1	37,3	30,6
17	2987	21,8	35,9	30,1
18	2781	21,9	33,2	25,9
19	2579	21,6	28,5	17,1
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>27,46 %</b>

**ANEXO 20.** *Eficiencia del colector solar para el día 9 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2116	19,6	27	22,3
08	2163	19,8	27,5	22,7
09	2204	20	29,4	27,2
10	2245	21,1	32,5	32,4
11	2648	21,2	34,8	32,8
12	2763	21,2	37,9	38,6
13	3160	21,7	41,2	39,4
14	3548	21,7	42,3	37,0
15	3414	21,9	41,4	36,4
16	3148	21,7	38,4	33,8
17	2963	21,4	37	33,6
18	2757	21,5	34,3	29,6
19	2555	21,2	29,6	20,9
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>31,29 %</b>

**ANEXO 21.** *Eficiencia del colector solar para el día 14 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2147	20,4	25,4	14,9
08	2194	20,6	25,9	15,4
09	2235	20,8	27,8	20,0
10	2276	21,9	30,9	25,2
11	2679	22	33,2	26,7
12	2794	22	36,3	32,7
13	3191	22,5	39,6	34,2
14	3579	22,5	40,7	32,4
15	3445	22,7	39,8	31,7
16	3179	22,5	36,8	28,7
17	2994	22,2	35,4	28,1
18	2788	22,3	32,7	23,8
19	2586	22	28	14,8
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>25,27 %</b>

**ANEXO 22.** *Eficiencia del colector solar para el día 5 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 5°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2167	20,3	26,1	17,1
08	2195	20,5	26,7	18,0
09	2221	20,6	28,9	23,9
10	2247	21,8	31,6	27,8
11	2565	21,9	33,9	29,9
12	2703	22	35,4	31,6
13	2956	22,3	39,2	36,5
14	3287	22,5	41,2	36,3
15	3331	22,1	41,3	36,8
16	3125	21,9	39,1	35,1
17	2965	21,7	35,9	30,5
18	2743	21,5	33,7	28,4
19	2521	21,3	29,4	20,5
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>28,64 %</b>

**ANEXO 23.** *Eficiencia del colector solar para el día 10 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 15°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2143	19,9	27,2	21,7
08	2171	20,1	27,8	22,6
09	2197	20,2	30	28,5
10	2223	21,4	32,7	32,4
11	2541	21,5	35	33,9
12	2679	21,6	36,5	35,5
13	2932	21,9	40,3	40,0
14	3263	22,1	42,3	39,5
15	3307	21,7	42,4	39,9
16	3101	21,5	40,2	38,4
17	2941	21,3	37	34,0
18	2719	21,1	34,8	32,1
19	2497	20,9	30,5	24,5
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>32,55 %</b>

**ANEXO 24.** *Eficiencia del colector solar para el día 15 de julio del 2016, con un ángulo de inclinación de 25°.*

<b>Hora</b>	<b>Radiación solar, G (Wh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada del agua, °C</b>	<b>Temperatura de salida del agua, °C</b>	<b>Eficiencia horaria, % (Ec. 5.1)</b>
07	2174	20,7	25,6	14,4
08	2202	20,9	26,2	15,4
09	2228	21	28,4	21,2
10	2254	22,2	31,1	25,2
11	2572	22,3	33,4	27,5
12	2710	22,4	34,9	29,4
13	2963	22,7	38,7	34,5
14	3294	22,9	40,7	34,5
15	3338	22,5	40,8	35,0
16	3132	22,3	38,6	33,2
17	2972	22,1	35,4	28,5
18	2750	21,9	33,2	26,2
19	2528	21,7	28,9	18,2
<b>Eficiencia promedio del día</b>				<b>26,4 %</b>